

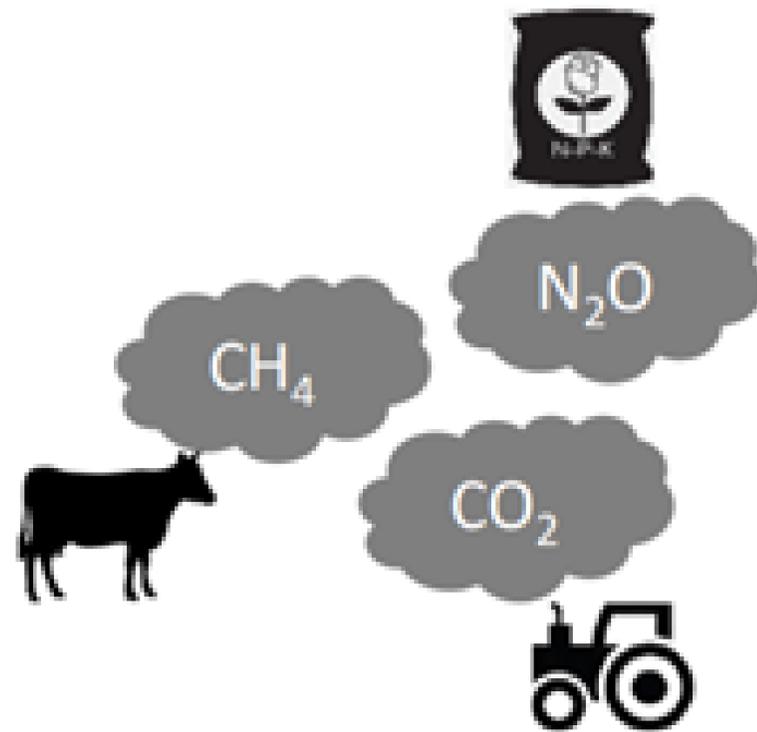


# ÉTUDE PORTANT SUR LES MESURES DE MÉTHANE ENTÉRIQUE DU CHEPTTEL BOVIN

MARIE RENEVEY

13/09/24

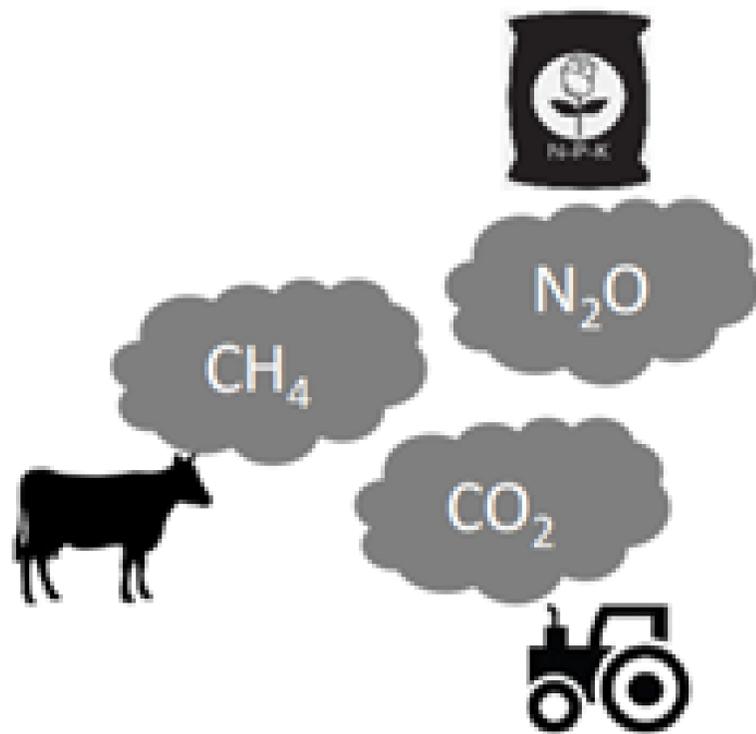
## des 3 principaux gaz à effet de serre



**Gaz à effet de serre (GES)** : Gaz d'origine naturelle (vapeur d'eau) ou anthropique (liée aux activités humaines) absorbant et réémettant une partie des rayons solaires (rayonnement infrarouge), phénomènes à l'origine de l'effet de serre.

(INSEE, 2021)

## des 3 principaux gaz à effet de serre



**Gaz à effet de serre (GES) :** Gaz d'origine naturelle (vapeur d'eau) ou anthropique (liée aux activités humaines) absorbant et réémettant une partie des rayons solaires (rayonnement infrarouge), phénomènes à l'origine de l'effet de serre.

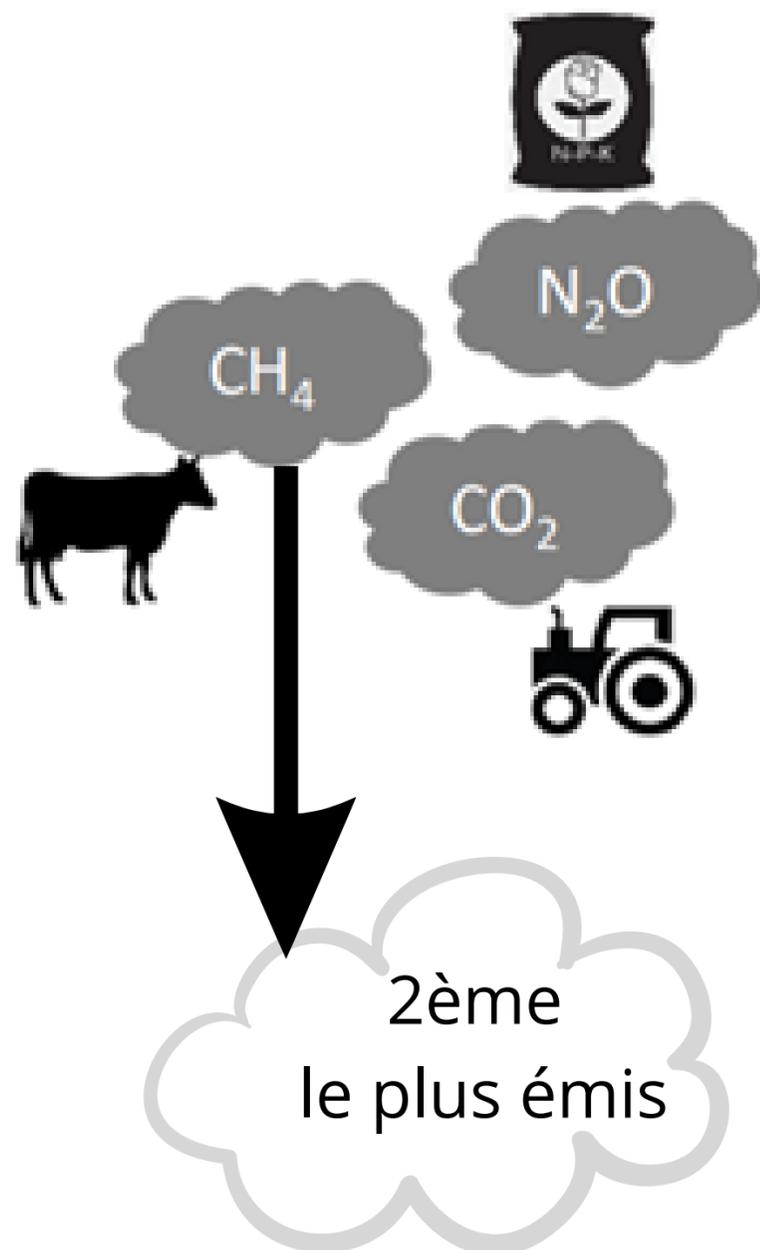
(INSEE, 2021)

**CO<sub>2</sub> équivalent :** La quantité émise de CO<sub>2</sub> qui provoquerait le même forçage radiatif intégré, pour un horizon temporel donné, qu'une quantité émise d'un seul ou de plusieurs gaz à effet de serre. L'émission en équivalent CO<sub>2</sub> est obtenue en multipliant l'émission d'un GES par son potentiel de réchauffement global (PRG) pour l'horizon temporel considéré.

(GIEC, 2018)

# Emissions de gaz à effet de serre

## des 3 principaux gaz à effet de serre



(Idèle, 2021 ; CITEPA, 2023)

**Gaz à effet de serre (GES)** : Gaz d'origine naturelle (vapeur d'eau) ou anthropique (liée aux activités humaines) absorbant et réémettant une partie des rayons solaires (rayonnement infrarouge), phénomènes à l'origine de l'effet de serre.

(INSEE, 2021)

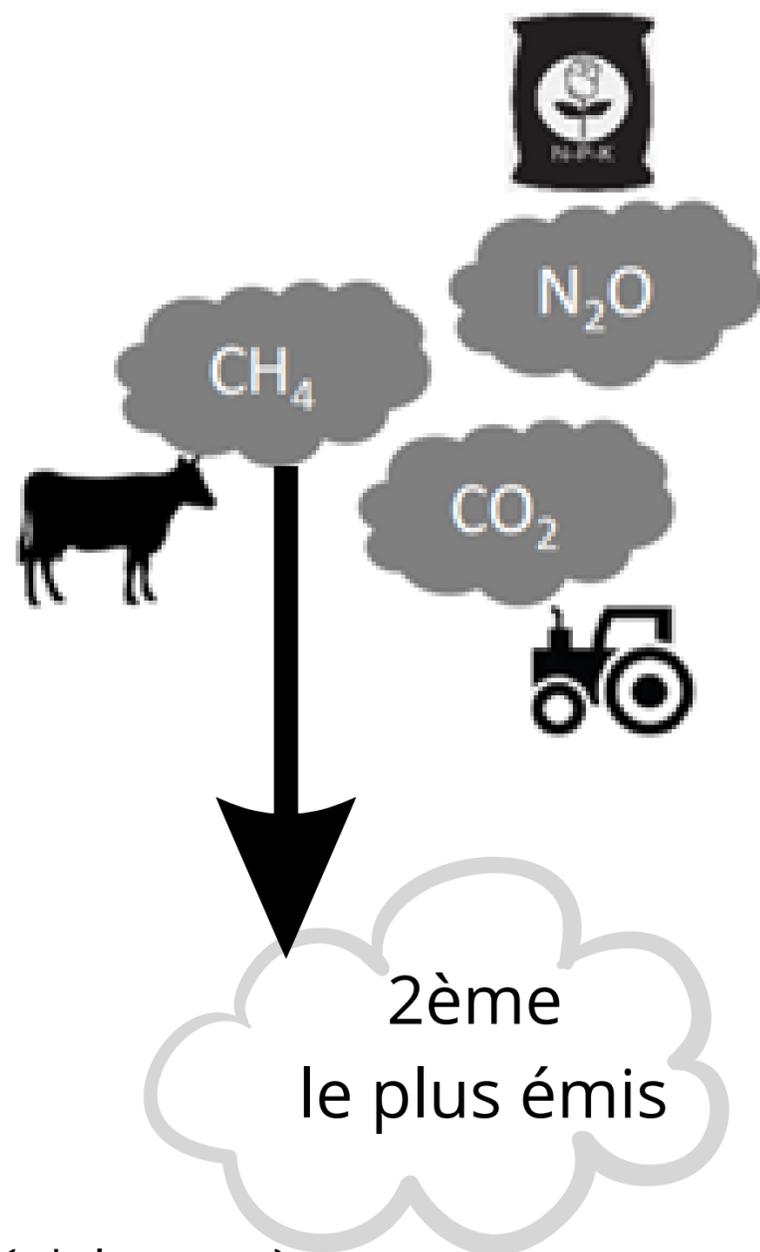
**CO<sub>2</sub> équivalent** : La quantité émise de CO<sub>2</sub> qui provoquerait le même forçage radiatif intégré, pour un horizon temporel donné, qu'une quantité émise d'un seul ou de plusieurs gaz à effet de serre. L'émission en équivalent CO<sub>2</sub> est obtenue en multipliant l'émission d'un GES par son potentiel de réchauffement global (PRG) pour l'horizon temporel considéré.

(GIEC, 2018)

**61,6 MtCO<sub>2</sub>e**

en France en 2022

## des 3 principaux gaz à effet de serre

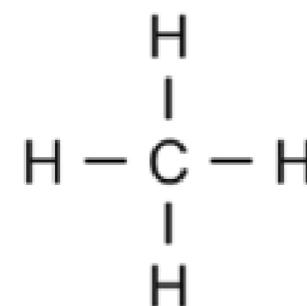
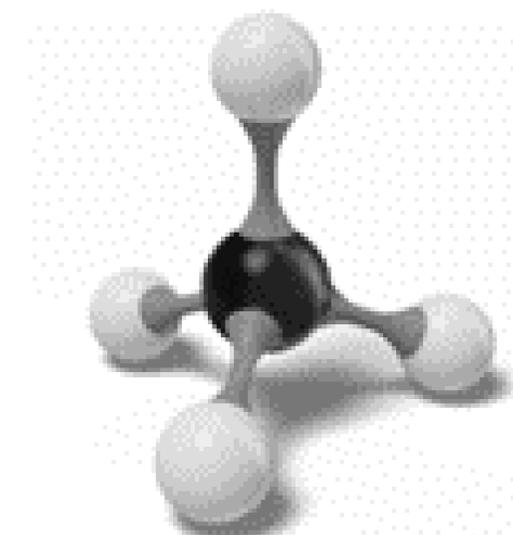


(Idèle, 2021)

Découvert par  
Alessandro  
Volta en 1778

CO<sub>2</sub> sert de référence  
(PRG = 1)

PRG de  
**27,9**  
Sur une période  
de 100 ans



1 atome de  
carbone et 4  
atomes  
d'hydrogène

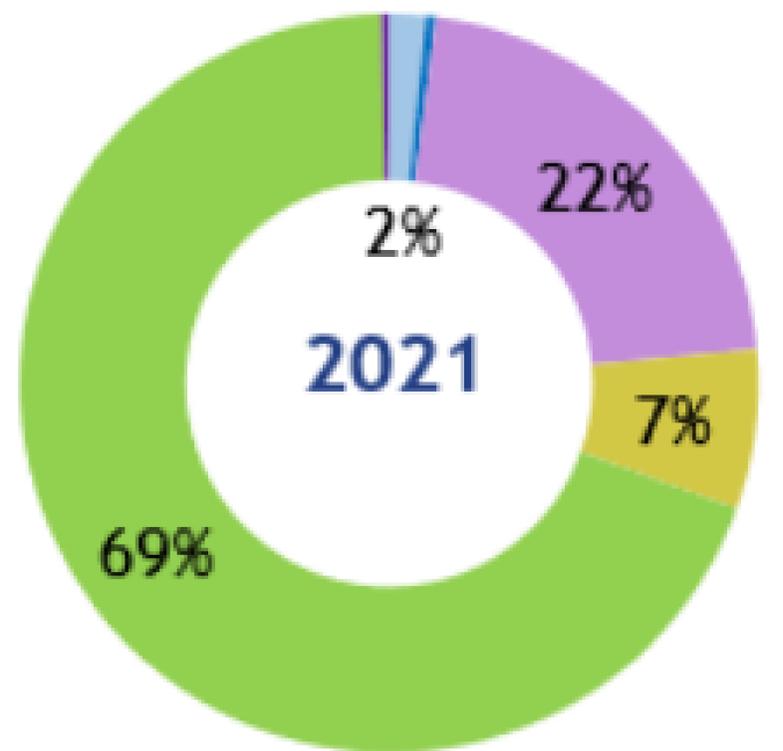
Durée de vie  
dans  
l'atmosphère  
**10-12 ans**

(GIEC, 2014)

**GES courte durée mais puissant**

# Émissions issues de l'agriculture

Répartitions des émissions de CH<sub>4</sub>  
hors UTCATF en France



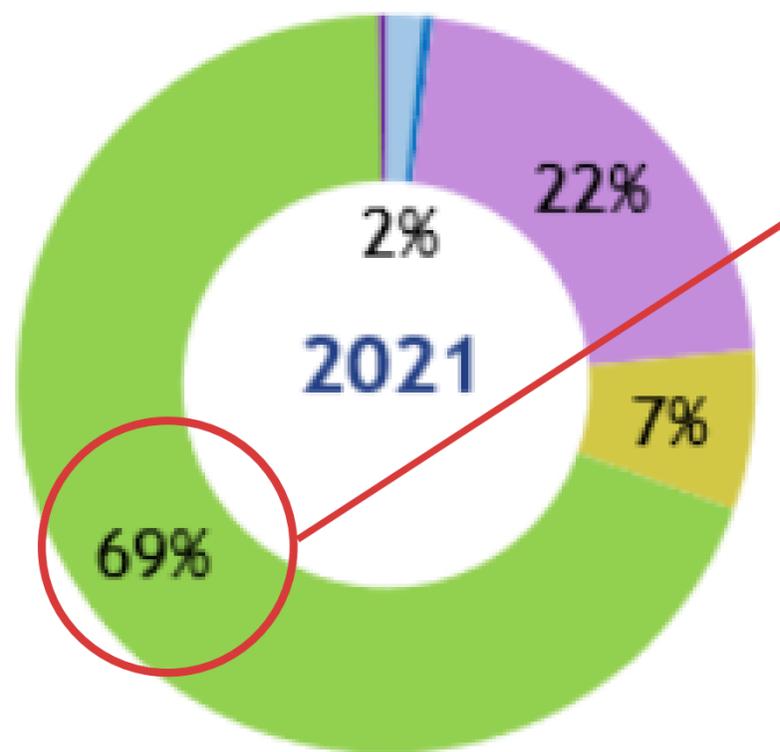
- Industrie de l'énergie
- Industrie manufacturière, construction
- Déchets (traitement centralisé)
- Usage et activités des bâtiments
- Agriculture et sylviculture
- Transports

(CITEPA, 2023)

(Vermorel et al., 2008)

# Émissions issues de l'agriculture

Répartitions des émissions de CH<sub>4</sub>  
hors UTCATF en France



- Industrie de l'énergie
- Industrie manufacturière, construction
- Déchets (traitement centralisé)
- Usage et activités des bâtiments
- Agriculture et sylviculture
- Transports

(CITEPA, 2023)

→ **42,6 MtCO<sub>2</sub>e** de méthane émis

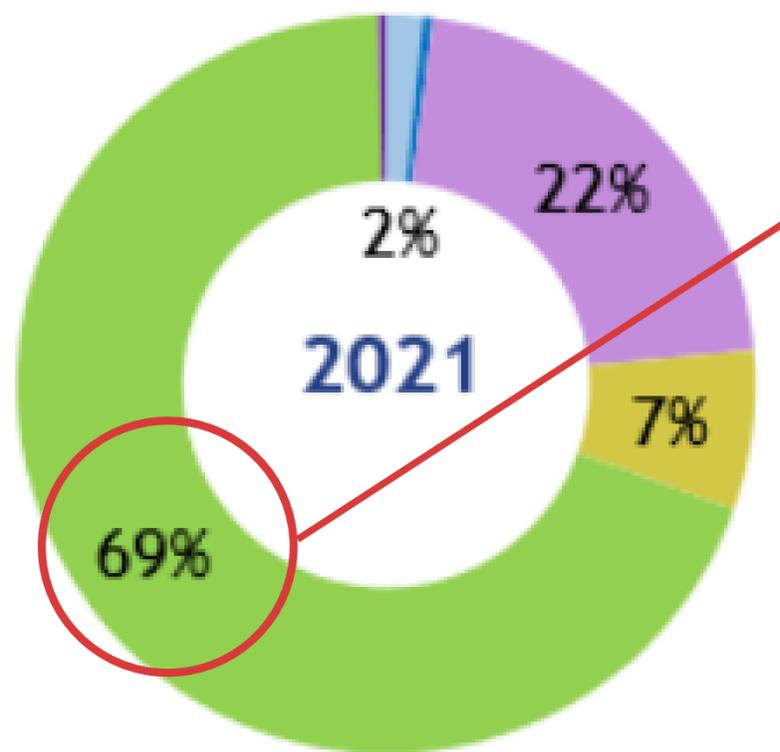


la fermentation entérique constitue  
85 % des émissions totales.

(Vermorel et al., 2008)

# Emissions issues de l'agriculture

Répartitions des émissions de CH<sub>4</sub> hors UTCATF en France



- Industrie de l'énergie
- Industrie manufacturière, construction
- Déchets (traitement centralisé)
- Usage et activités des bâtiments
- Agriculture et sylviculture
- Transports

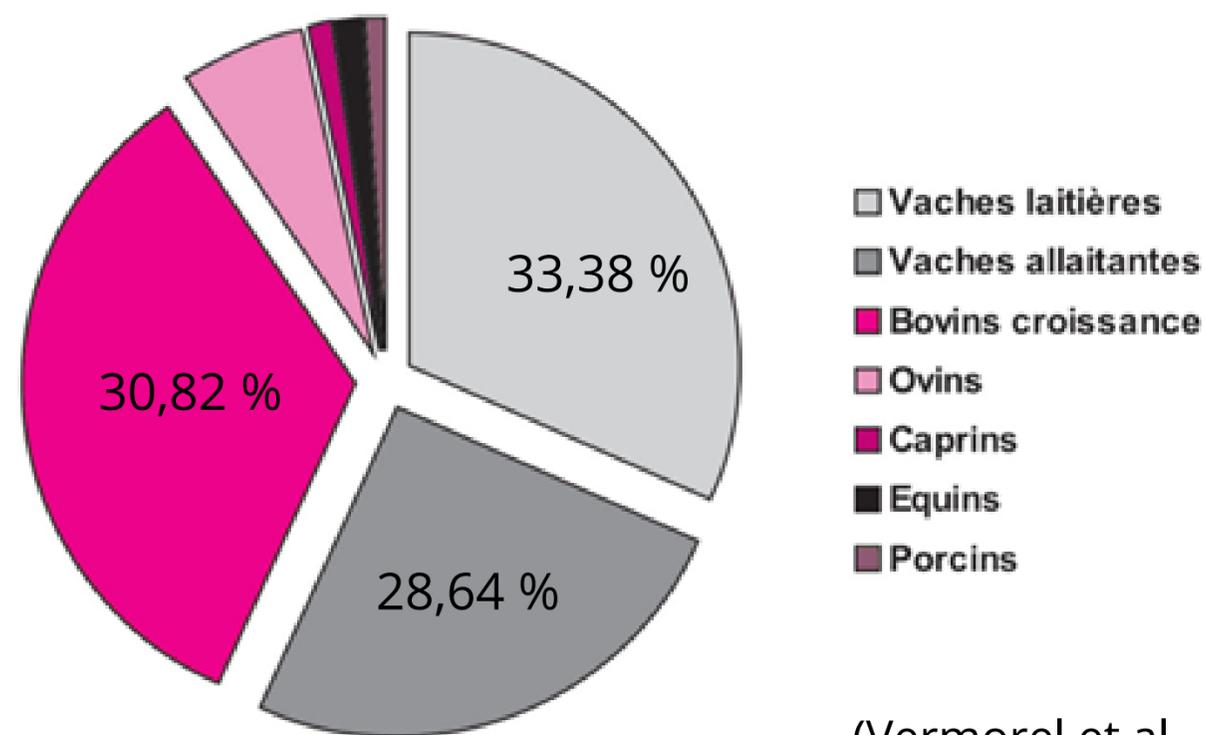
(CITEPA, 2023)

42,6 MtCO<sub>2</sub>e de méthane émis



La fermentation entérique constitue 85 % des émissions totales.

Contribution relative (%) des principales catégories d'animaux d'élevage aux émissions de méthane entérique en France.



(Vermorel et al., 2008)

Cheptel bovin représente **92,84 %** des émissions totales de méthane entérique

Comment évaluer les émissions de méthane entérique des bovins et quelles sont les facteurs liés à l'animal et les pratiques d'élevages impliquant une variation de ces émissions ?



LA PRODUCTION DE MÉTHANE PAR LES BOVINS



CONTEXTE, MATÉRIEL ET PROTOCOLE DE L'ÉTUDE

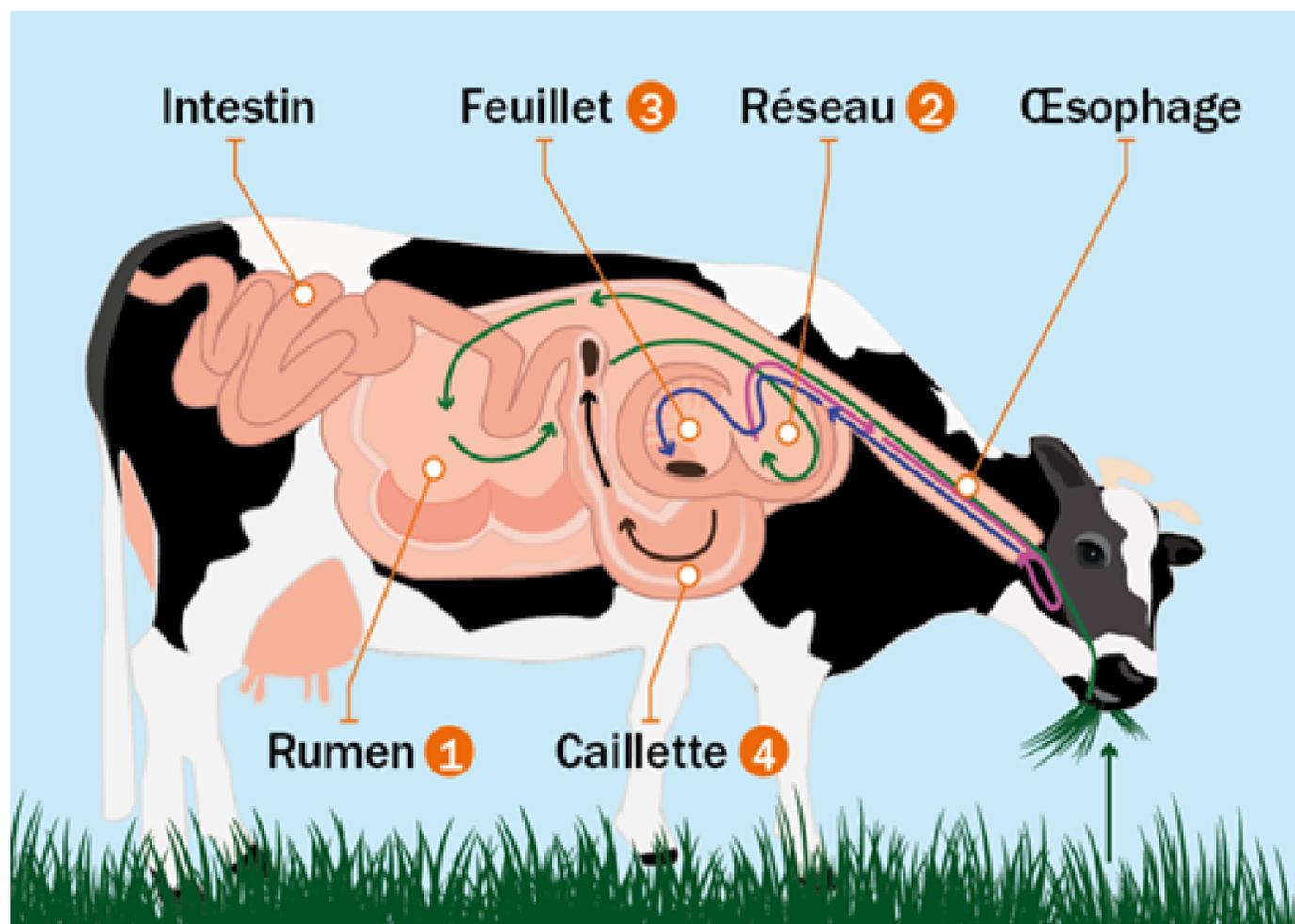


RÉSULTAS ET DISCUSSIONS DE L'ÉTUDE

# La production de méthane par les bovins

# Anatomie digestive de la vache

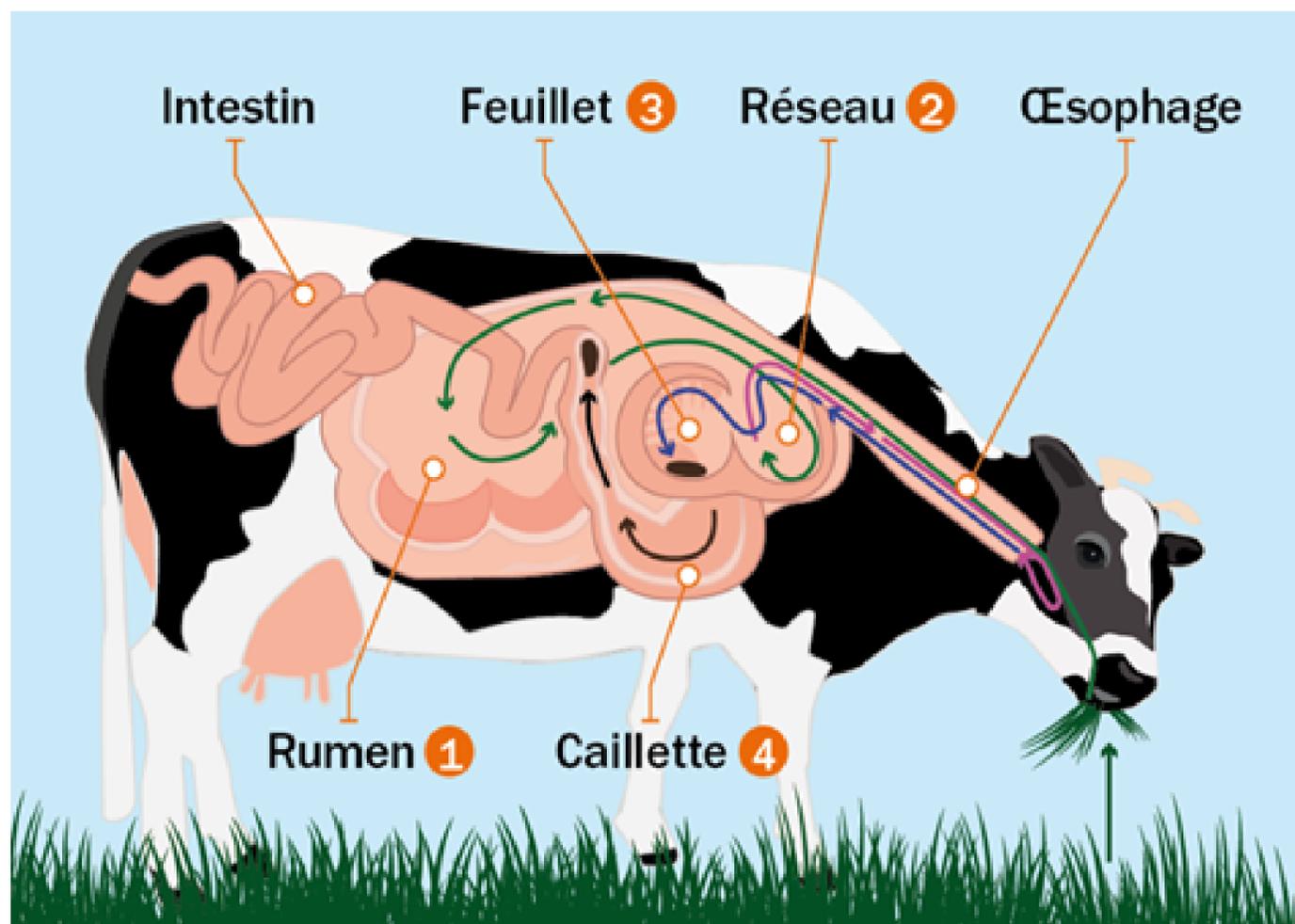
## Schéma de la digestion des vaches



(CNIEL, 2022)

# Anatomie digestive de la vache

## Schéma de la digestion des vaches



(CNIEL, 2022)

## Caractéristiques du rumen



Température 39°C

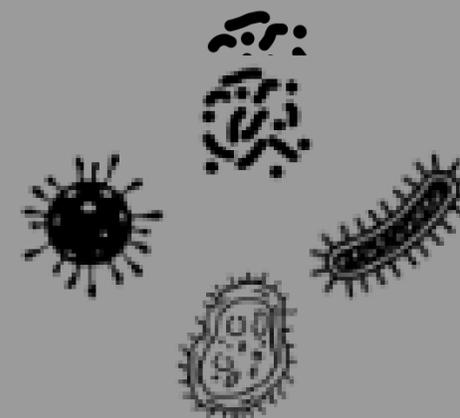


pH variant de 5,5 à 7



100 à 150 litres

Anaérobie

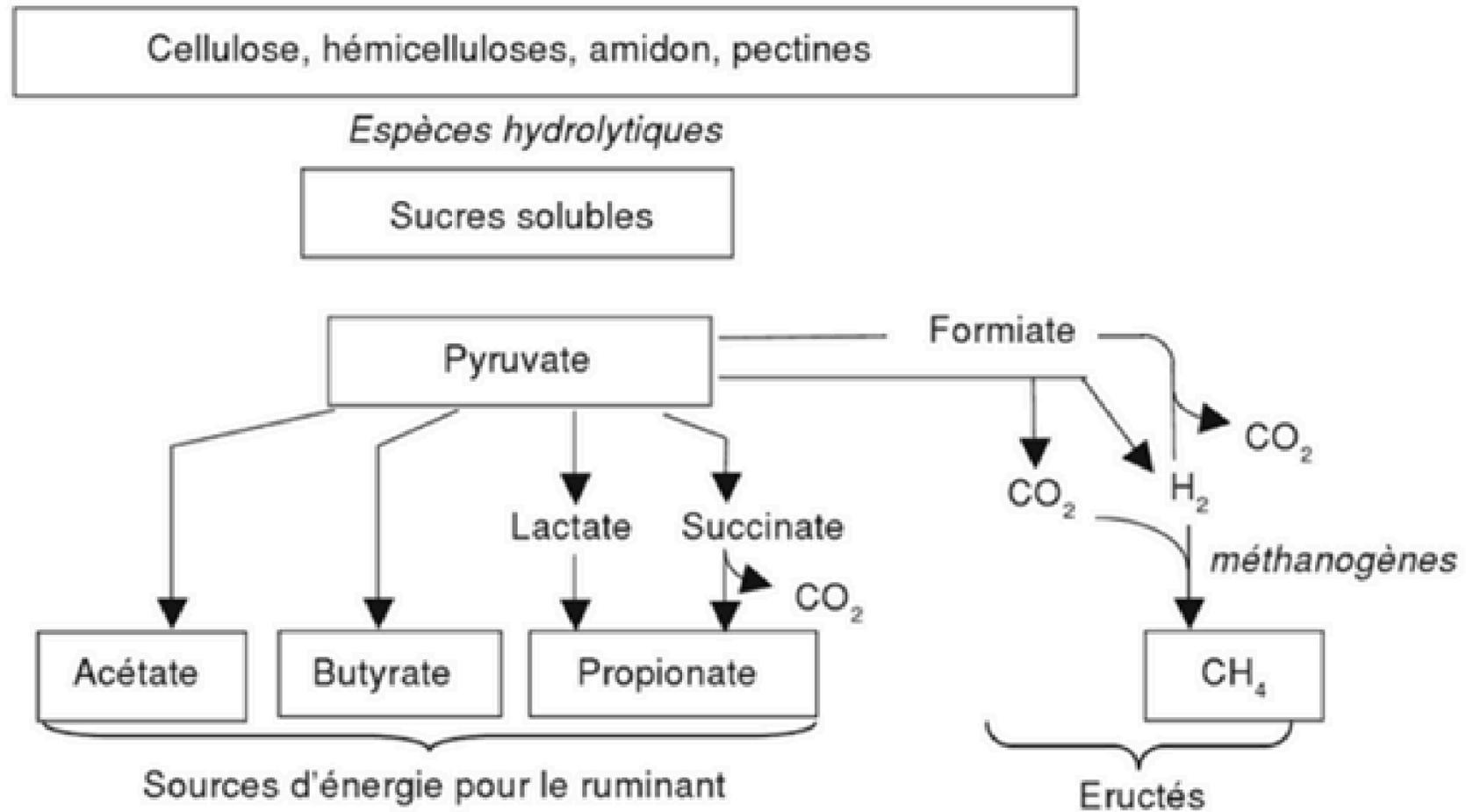


bactéries, archées, protozoaires  
ciliés, champignons, virus

(Jouany et al, 2008 ; Moletta, 2011)

# Production méthane entérique

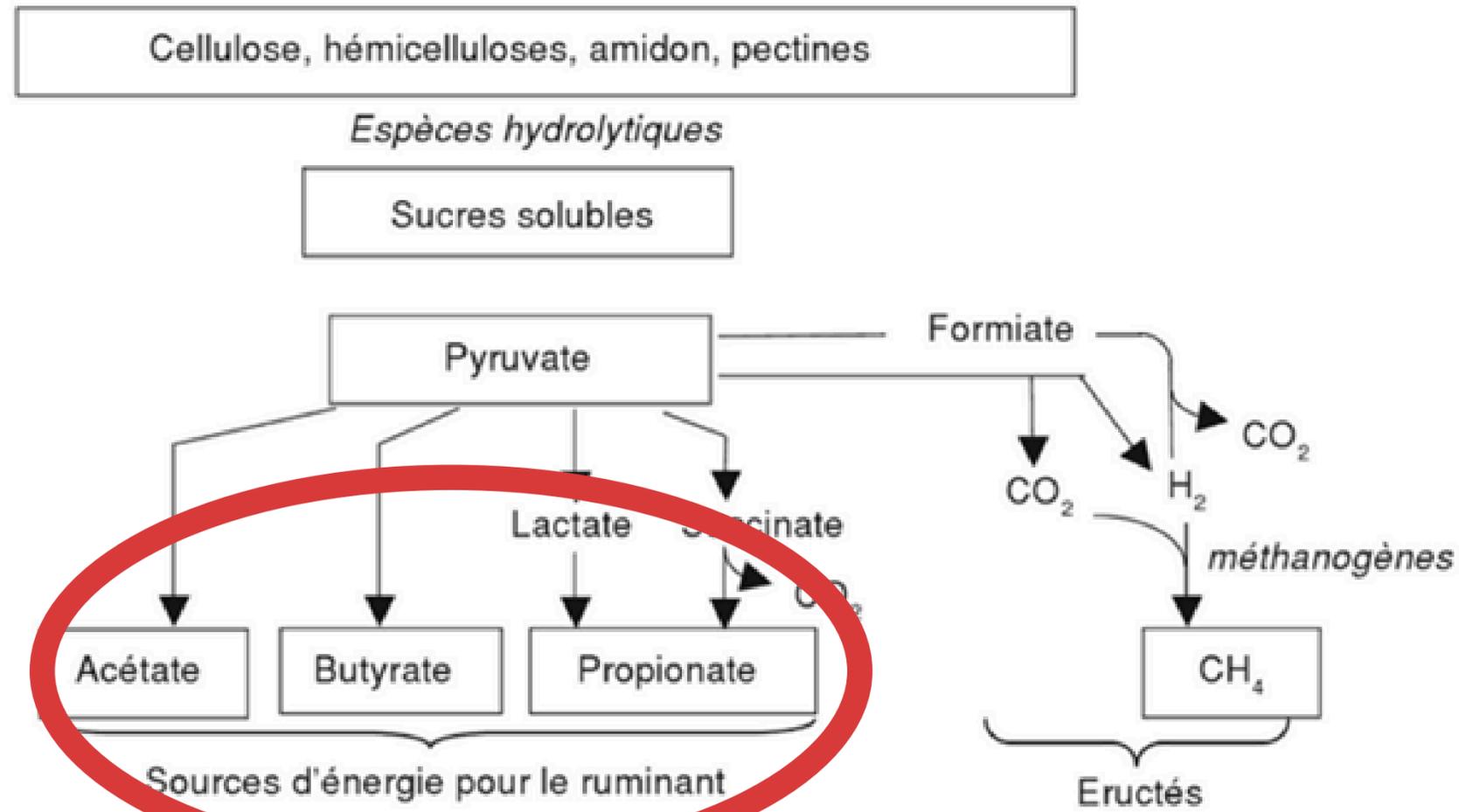
Chaîne de dégradation des polyholosides alimentaires  
chez le ruminant



(Moletta, 2011)

# Production méthane entérique

Chaîne de dégradation des polyholosides alimentaires chez le ruminant



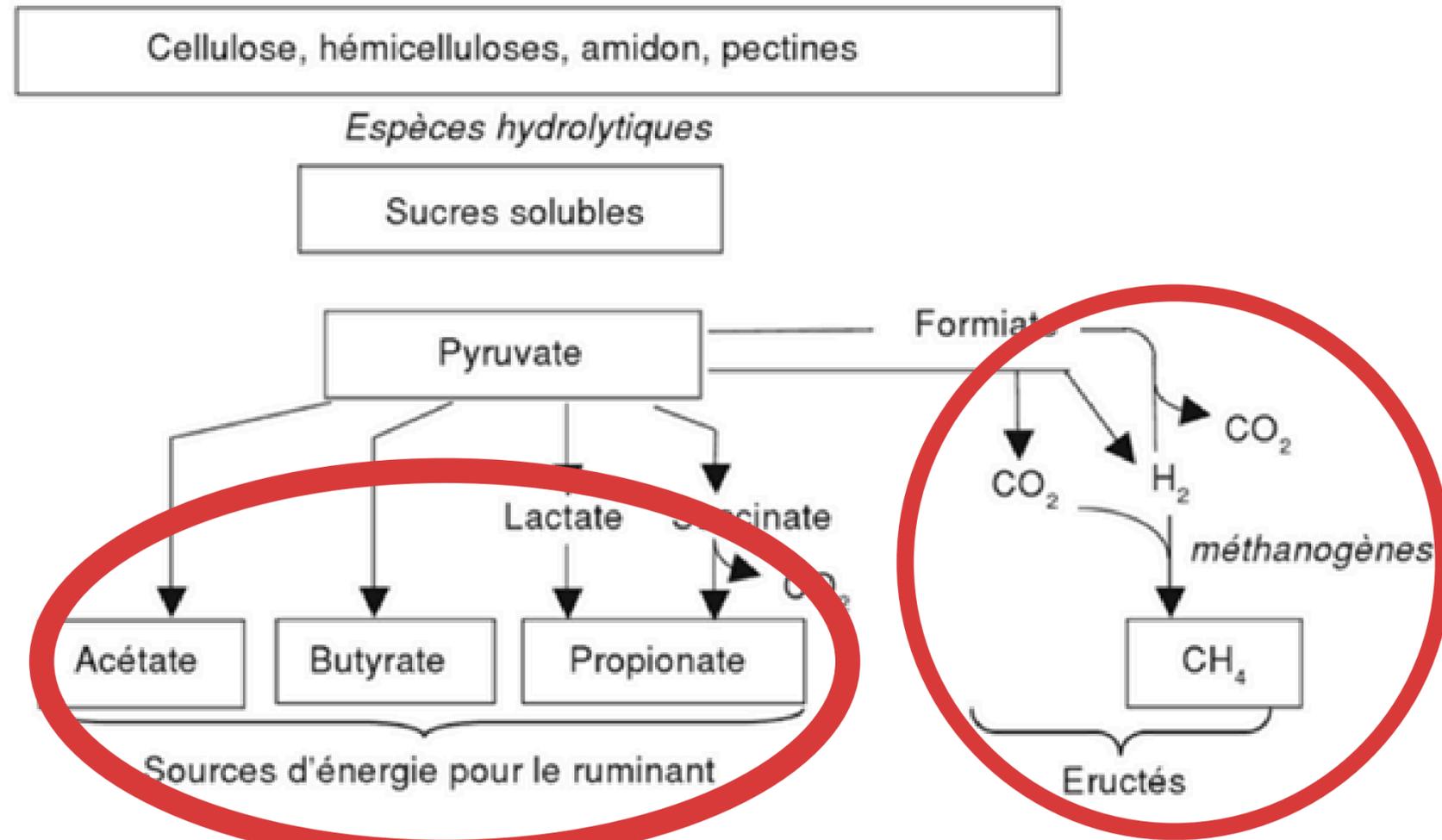
(Moletta, 2011)

AGV → génère 70% de l'énergie

(Lan et al., 2019)

# Production méthane entérique

Chaîne de dégradation des polyholosides alimentaires chez le ruminant



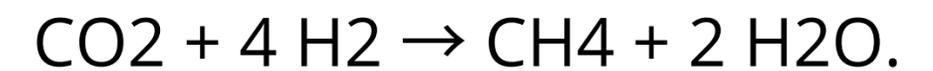
(Moletta, 2011)

AGV → génère 70% de l'énergie

(Lan et al., 2019)



Archées méthanogènes





## Alimentation

- Quantité d'ingestion (Charmley et al., 2016; Congio et al., 2022)



Moteur principale de la production de méthane

- La part de concentré dans la ration (Ricci et al. (2014); Doreau, 2017)
- Digestibilité de la Matière Organique



## Alimentation

- Quantité d'ingestion (Charmley et al., 2016; Congio et al., 2022)



Moteur principale de la production de méthane

- La part de concentré dans la ration (Ricci et al. (2014); Doreau, 2017)
- Digestibilité de la Matière Organique



## Stade physiologique

- Parité de l'animal
- Vaches laitière en lactation vs tarie



## Génétique

- Sélection des animaux faibles émetteurs

# Contexte, matériels et protocole de l'étude

# Life Carbon Farming



Projet coordonné par l'IDELE en partenariat avec 6 pays de l'Union européenne : la France, la Belgique, l'Irlande, l'Allemagne, l'Italie et l'Espagne



700 fermes partenaires



Réduire de 15 % l'empreinte carbone de la polyculture-élevage  
Impliquer les agriculteurs et agricultrices dans la mise en place de pratiques bas carbone

# Life Carbon Farming



Projet coordonné par l'IDELE en partenariat avec 6 pays de l'Union européenne : la France, la Belgique, l'Irlande, l'Allemagne, l'Italie et l'Espagne



700 fermes partenaires

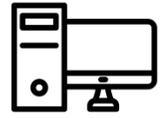


Réduire de 15 % l'empreinte carbone de la polyculture-élevage  
Impliquer les agriculteurs et agricultrices dans la mise en place de pratiques bas carbone

Missions principales :

- Mesurer et observer les variations des émissions en fonction de différents facteurs:  
les systèmes de production, l'alimentation des animaux, stade physiologique  
Mesures méthane réaliser a deux moments (actuellement et dans quelques années)  
Mesures réalisé dans les 6 pays du projet  
Stage exploratoire pas de visée de faire de la référence
- Corréler les résultats obtenus sur les exploitations avec le Laser Méthane Detector (LMD) et les résultats obtenus sur CAP'2ER

 Calcul Automatisé des Performances Environnementales en Élevage de Ruminants



Outil informatique développé depuis 2014 par IDELE

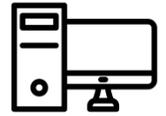


Réaliser une évaluation environnementale multicritère à l'échelle de l'exploitation, des ateliers et des produits



Évaluation empreinte carbone sous forme d'un questionnaire

 Calcul Automatisé des Performances Environnementales en Élevage de Ruminants



Outil informatique développé depuis 2014 par IDELE



Réaliser une évaluation environnementale multicritère à l'échelle de l'exploitation, des ateliers et des produits



Évaluation empreinte carbone sous forme d'un questionnaire

## Prédiction d'émissions de méthane entérique par l'équation de Sauvant et Nozière 2013

$$\text{CH}_4 \text{ entérique (g/kg MOD/tête/an)} = 45,42 - 6,66 * \text{MSI\%PV} + 0,75 * (\text{MSI\%PV})^2 + 19,65 * \text{PCO} - 35 * (\text{PCO})^2 - 2,69 * \text{MSI\%PV} * \text{PCO}$$

*MSI%PV* = matière sèche ingérée pour 100 kg de poids vif

*PCO* = pourcentage de concentrés dans la ration (% MS)

**MOD** = Matière Organique Digestible

# Méthodes de mesure de référence

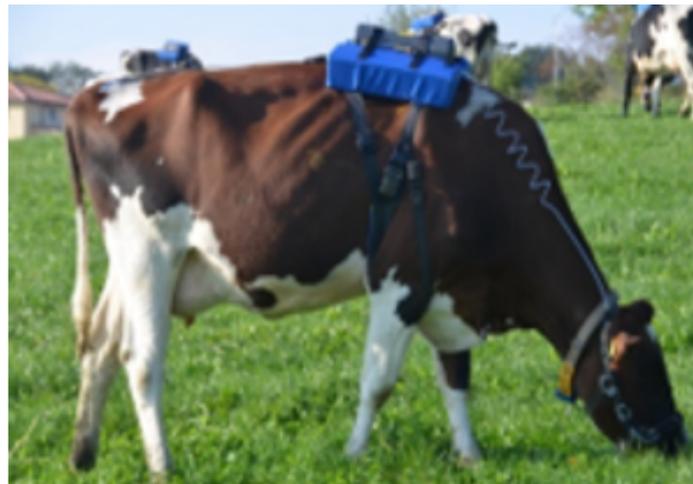
Chambre  
respiratoire



Mesure continue  
dans une chambre  
au flux d'air  
contrôlé

$$\text{CH}_4 \text{ (g/j)} = \text{flux air} \times [\text{CH}_4]$$

Le gaz traceur  
SF6



Harnais de collecte de  
gaz + bolus de gaz  
traceur dont le taux  
de relargage dans le  
rumen est connu

$$\text{CH}_4 \text{ (g/j)} = \text{SF}_6 \text{ bolus} \times \frac{[\text{CH}_4]}{[\text{SF}_6]}$$

Le GreenFeed



Distributeur d'aliment  
couplé à différents  
capteurs

$$\text{CH}_4 \text{ (g/j)} = \text{flux d'air} \times [\text{CH}_4]$$

# Le Laser Methane Detector : Généralité

Utilisé pour repérer  
les fuites de gaz

2009 1ere mesure  
méthane (Chagunda)

Commercialisé par  
Crowcon



# Le Laser Methane Detector : Généralité

Utilisé pour repérer les fuites de gaz

2009 1ere mesure méthane (Chagunda)

Commercialisé par Crowcon

(en ppm\*m)



Spectroscopie d'absorption infrarouge.

Equipé d'un laser à semi-conducteur de longueur d'onde 1 653 nm => spécifique du méthane

Mesure la concentration cumulée de méthane le long de la trajectoire du laser dans la zone d'étude

Plage detection de 1 à 50 000 ppm × m avec une précision de ±10%

Données sur un appareil connecté

# Le Laser Methane Detector : Généralité

Utilisé pour repérer les fuites de gaz

2009 1ere mesure méthane (Chagunda)

Commercialisé par Crowcon

(en ppm\*m)

Changements de comportement minimales des animaux  
Flexible

Corrélation chambre respiratoire  
(Chagunda, 2013)  
( $r = 0.8$ ,  $p = 0.001$ )



Concentration et non flux  
Pas de protocole standard

Spectroscopie d'absorption infrarouge.

Equipé d'un laser à semi-conducteur de longueur d'onde 1 653 nm => spécifique du méthane

Mesure la concentration cumulée de méthane le long de la trajectoire du laser dans la zone d'étude

Plage detection de 1 à 50 000 ppm × m avec une précision de  $\pm 10\%$

Données sur un appareil connecté

# Protocole de mesure



Utilisation de l'écran pour isoler la vache afin que les émissions des vaches voisines n'interfèrent pas.



4 minutes



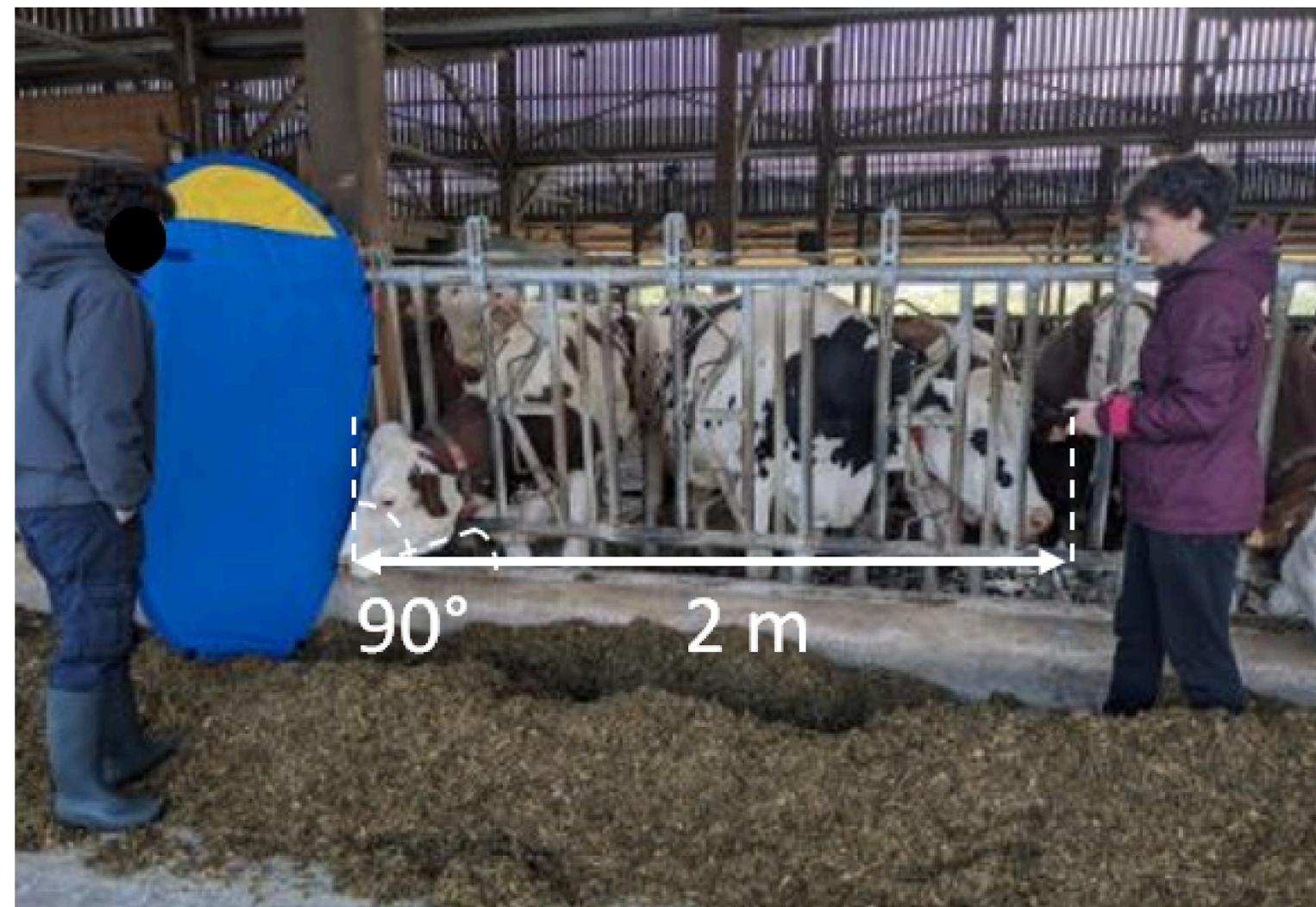
Téléphone portable connecté en Bluetooth



20 vaches mesurées dans chaque ferme



24 fermes dans différentes régions de France



**Homogénéité dans les mesures début 1heure après distribution de l'aliment<sup>14</sup>**

# Critères de sélection des vaches



## Vaches laitières

### **Nombre de lactation 3 groupes :**

- Lactation 1
- Lactation 2
- Lactation 3 et plus

### **Stade de lactation 4 groupes :**

- Début (1-100 jours)
- Milieu (101-200 jours)
- Fin (>200 jours)
- Tari



## Vaches allaitantes

### **Parité 2 groupes :**

- Primipare
- Multipare

### **Stade physiologique 2 groupes :**

- Vache en gestation
- Vache en lactation

# Critères de sélection des vaches



Vaches laitières

		Nombre de lactation			Somme
		1	2	3+	
Stade de lactation	Début	25	25	45	95
	Milieu	28	20	33	81
	Fin	32	32	41	105
	Tari	8	11	22	41
Somme		93	88	141	322



Vaches allaitantes

	Primipare	Multipare	Somme
Animal en gestation	3	20	23
Animal en lactation	35	81	116
Somme	38	101	139

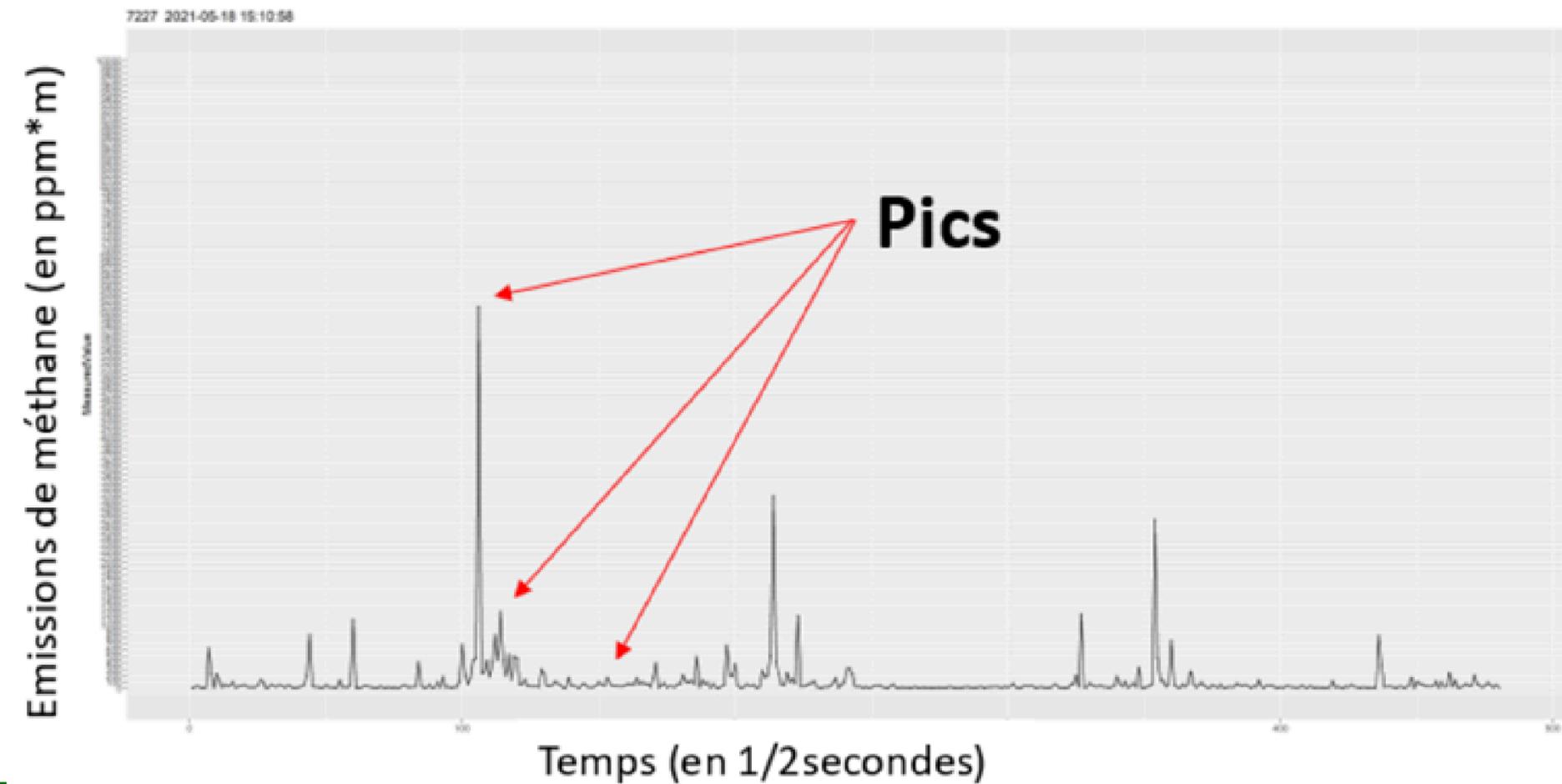


461

**23 fermes dont :**  
16 fermes laitières et  
7 fermes allaitantes

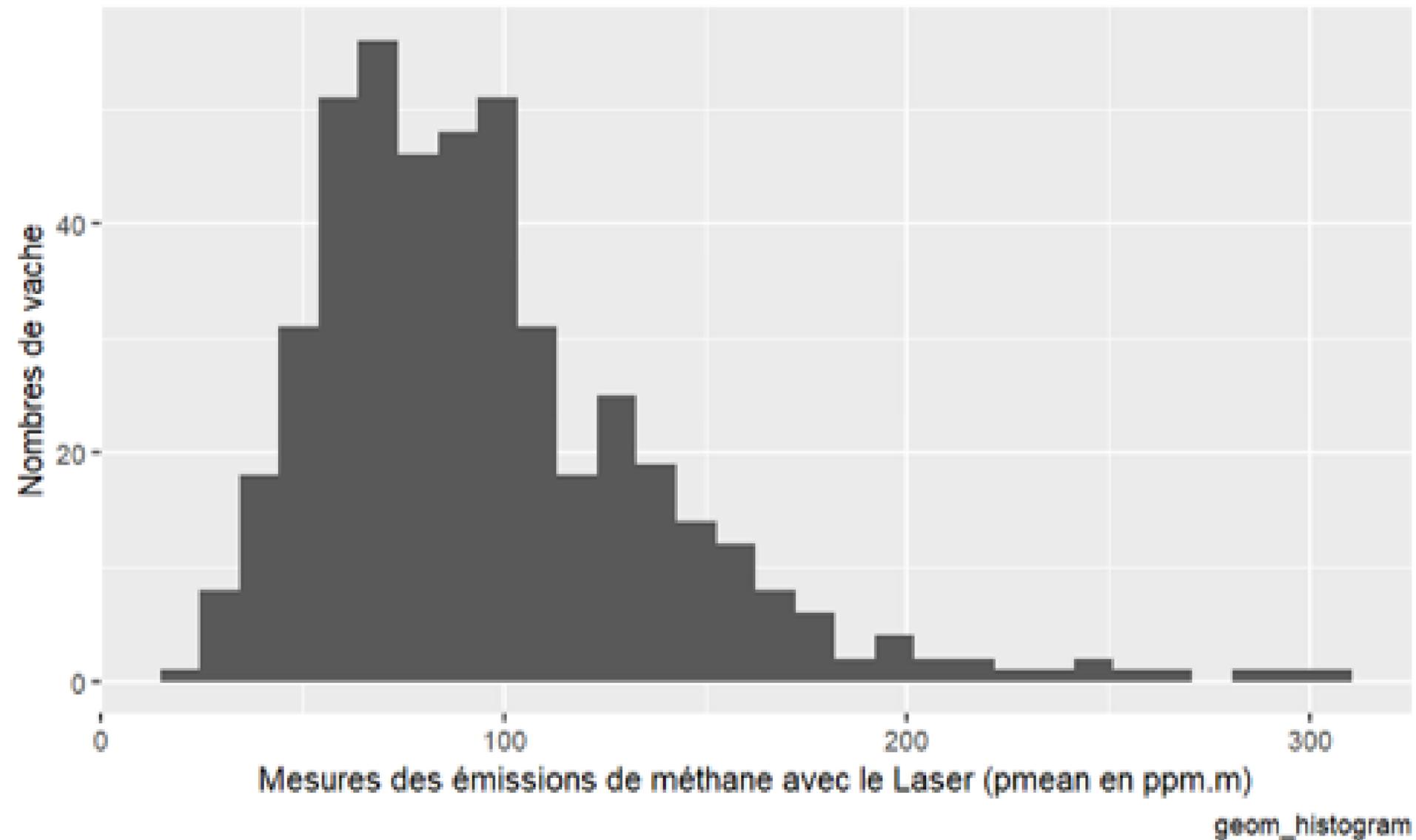
La variable "PMEAN" ou "moyenne des pics" est une variable définie par Sorg et al. en 2018. Cette valeur correspond à la moyenne arithmétique de tous les pics des mesures de CH<sub>4</sub> (et non la moyenne de toutes les valeurs enregistrées par demi-seconde). Cette PMEAN a été calculée en reconnaissant un pic à l'aide du logiciel R. Pour cela, une mesure  $x_{i-1}$  est définie comme un pic si  $x(i) - x(i-1)$  est négatif et  $x(i-1) - x(i-2)$  est supérieur ou égal à supérieur ou égal à 0 (Sorg et al., 2018).

Graphique des émissions de méthane en fonction des pics



# Résultats et discussions de l'étude

Histogramme de la distribution des mesures de CH4 issues du LMD

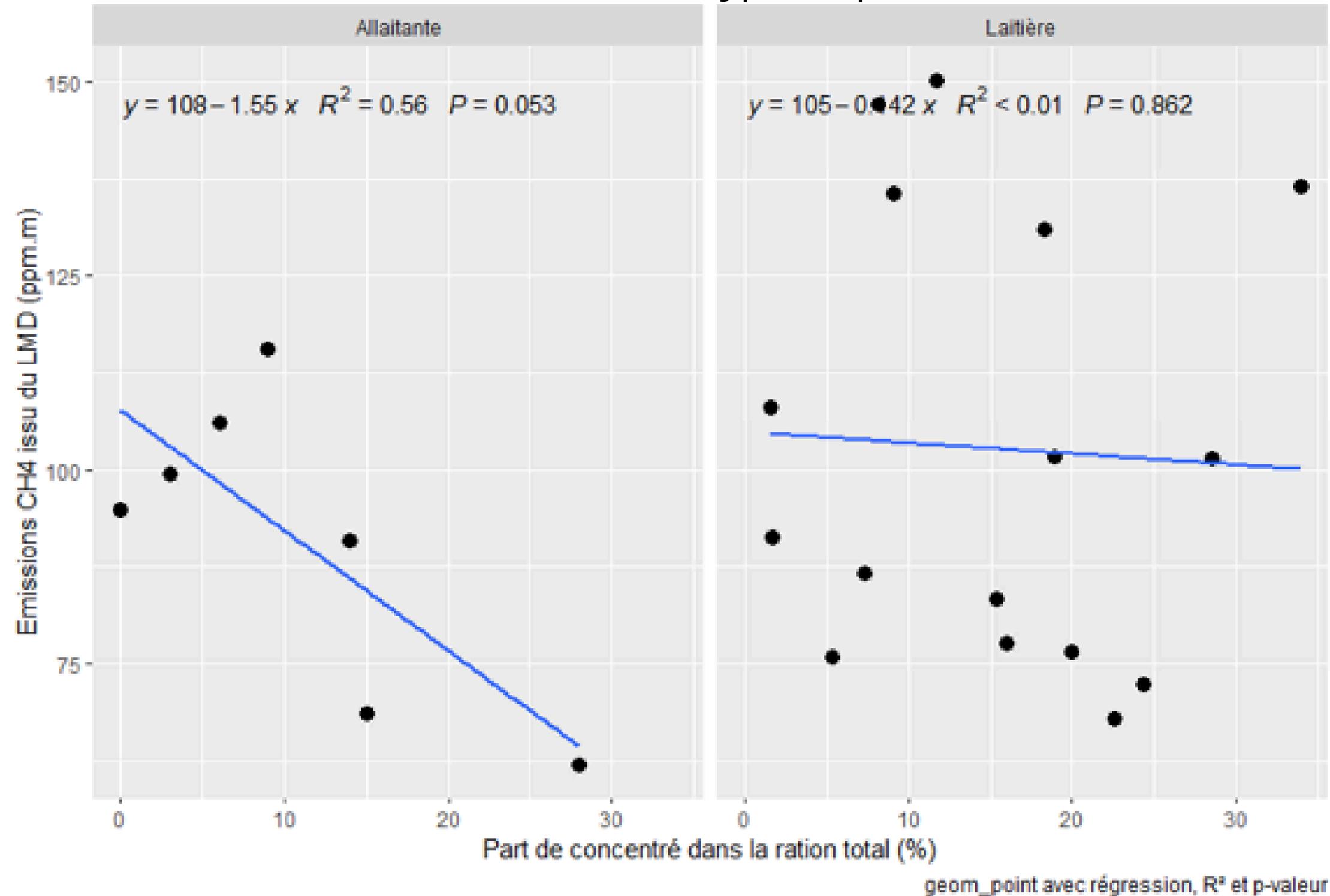


Minimum : 20ppm.m  
Maximum : 306 ppm.m  
Moyenne : 96 ppm.m  
Écart type : 39 ppm.m

Grande diversité des résultats

# Alimentation : part de concentrés dans la ration

Emissions de méthane issus du LMD en fonction de la part de concentré dans la ration et du type de production



## Vaches allaitantes

$R^2$  de 0,56 et une p-valeur de 0,053

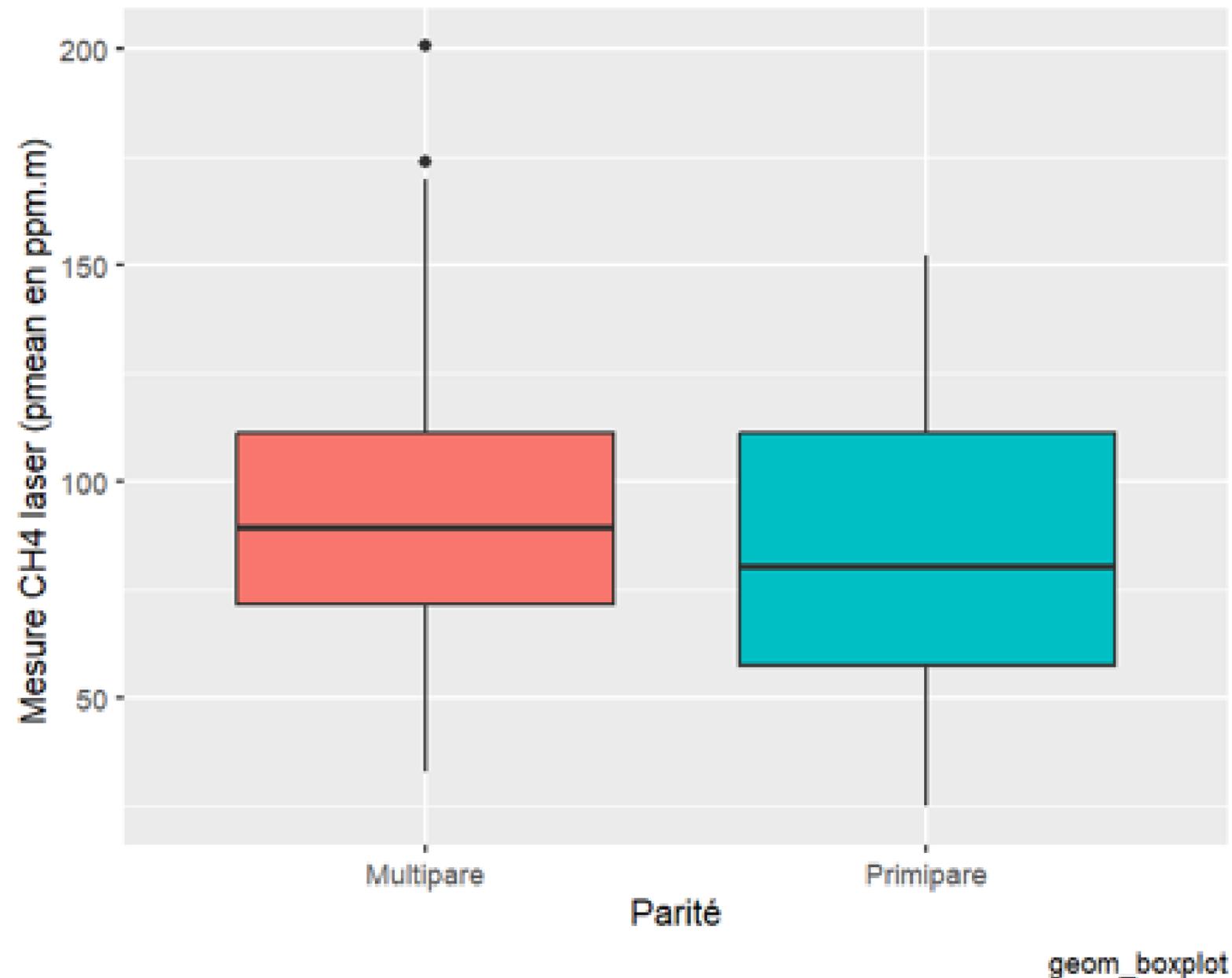
**Relation modérée** entre la production de  $\text{CH}_4$  et la part de concentré dans la ration

## Vaches laitières

$R^2$  est inférieur à 0,01 et la p-valeur est de 0,862

le modèle de régression linéaire **pas fiables**.

Boxplot de mesures de CH4 issues du LMD en fonction de la parité des animaux



$p$ -value= 0.022 significatif

## Utilisation d'ANOVA (Analysis of Variances)

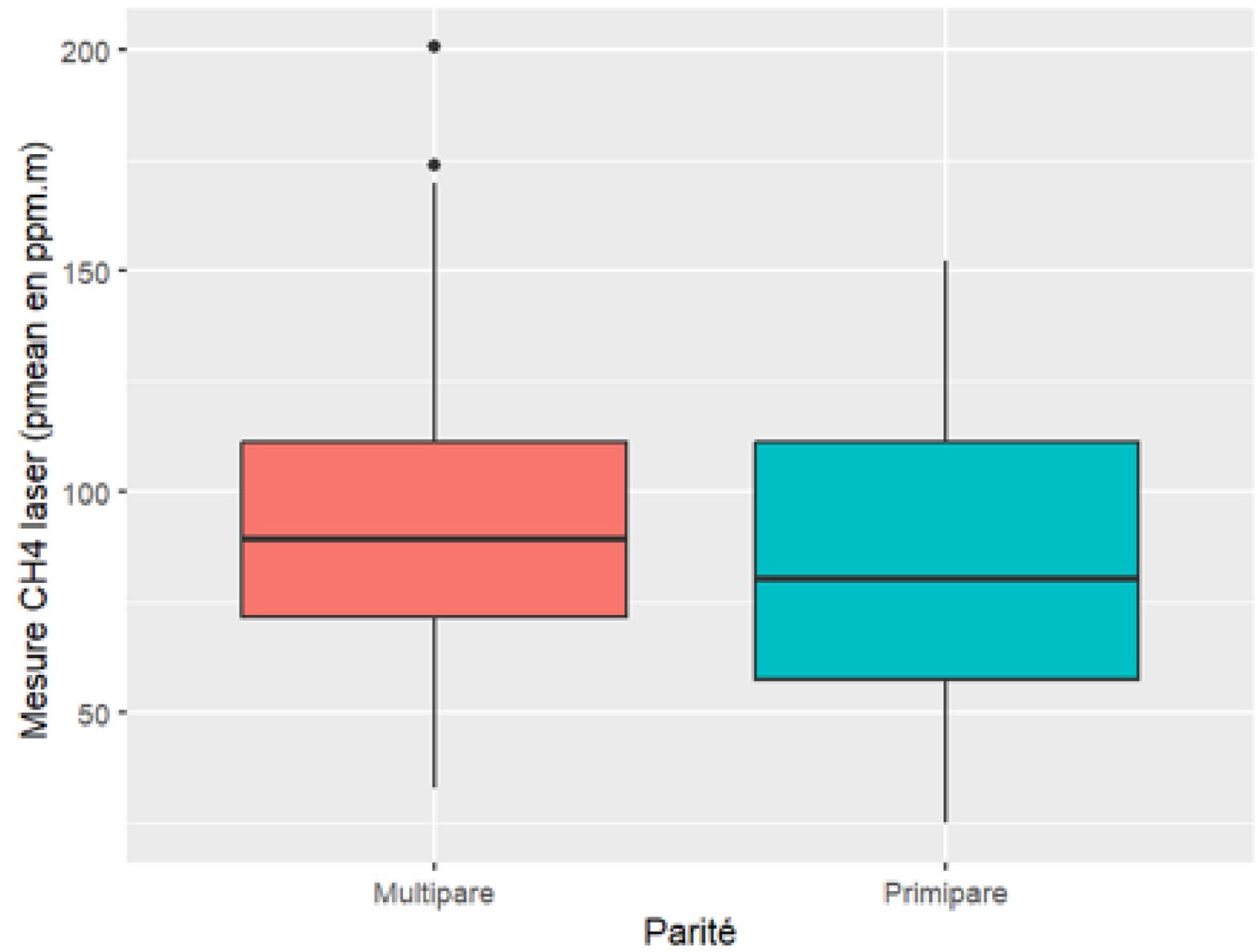
=tester si il y a des différences entre deux ou plusieurs moyennes

## Vérification des hypothèses

- La normalité avec Shapiro test ( $p > 0.05$ )
- L'homogénéité des variances avec Bartlett test ( $p > 0.05$ )

# Vaches allaitantes

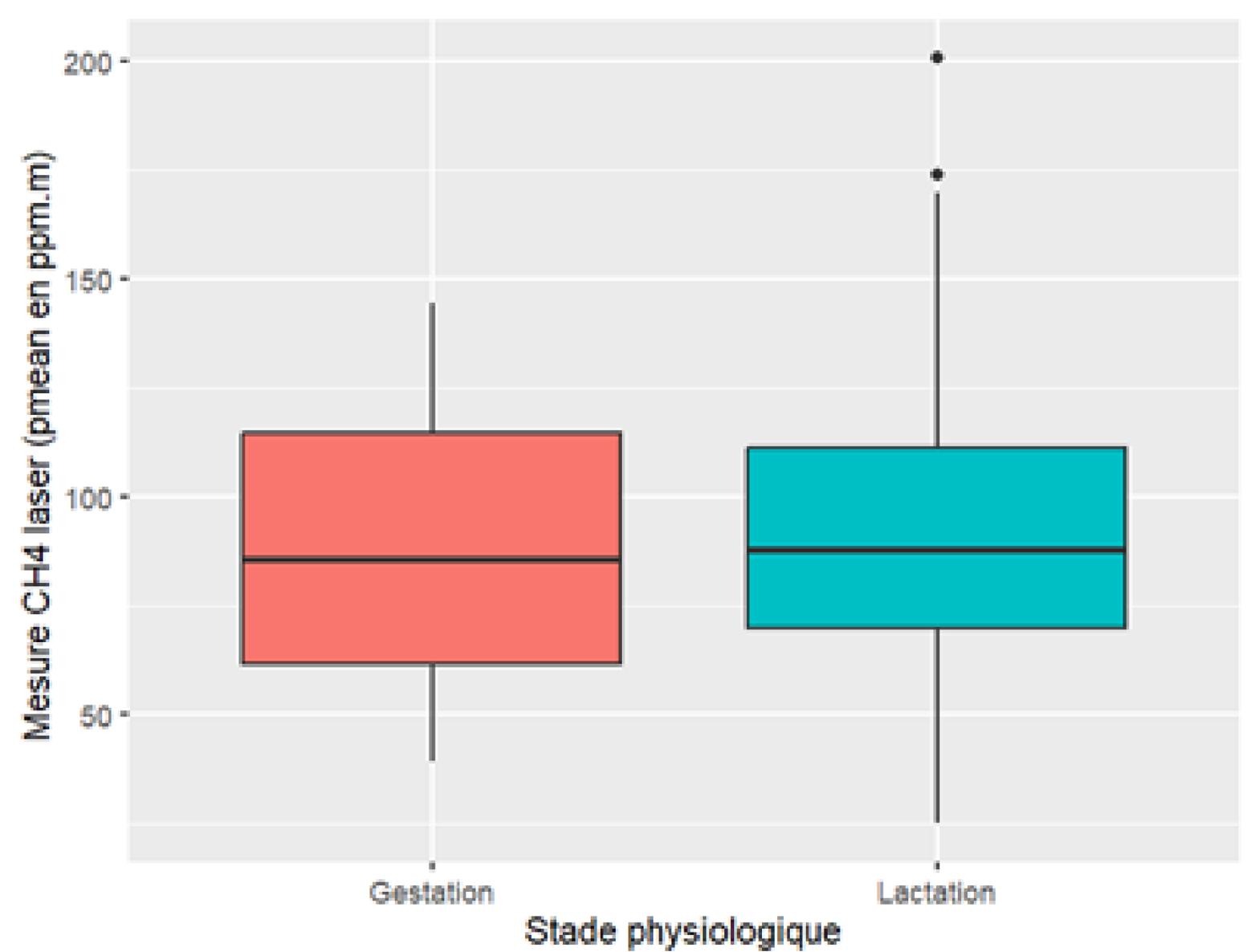
Boxplot de mesures de CH4 issues du LMD en fonction de la parité des animaux



$p$ -value= 0.022 significatif

geom\_boxplot

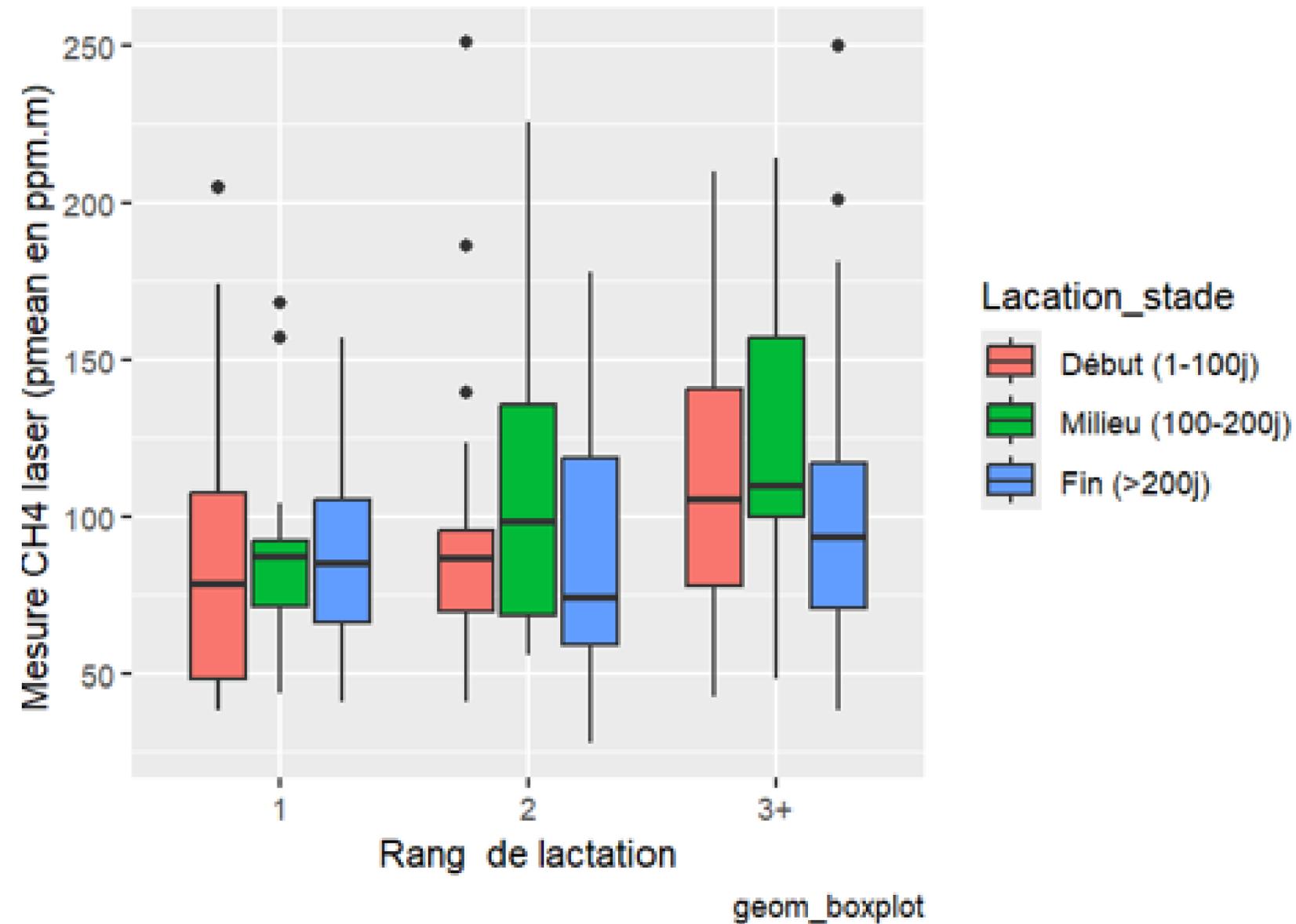
Boxplot comparaison des émissions de méthane en fonction du stade de physiologique



$p$ -value= 0.77 non significatif

geom\_boxplot

Boxplot des mesures issues du laser en fonction du stade et du rang de lactation pour les vaches laitières



## Émissions de méthane

Rang de lactation  $p = 0.004$  significatif

Accord avec étude Dalls Orsoletta et al, 2019

Hypothèse

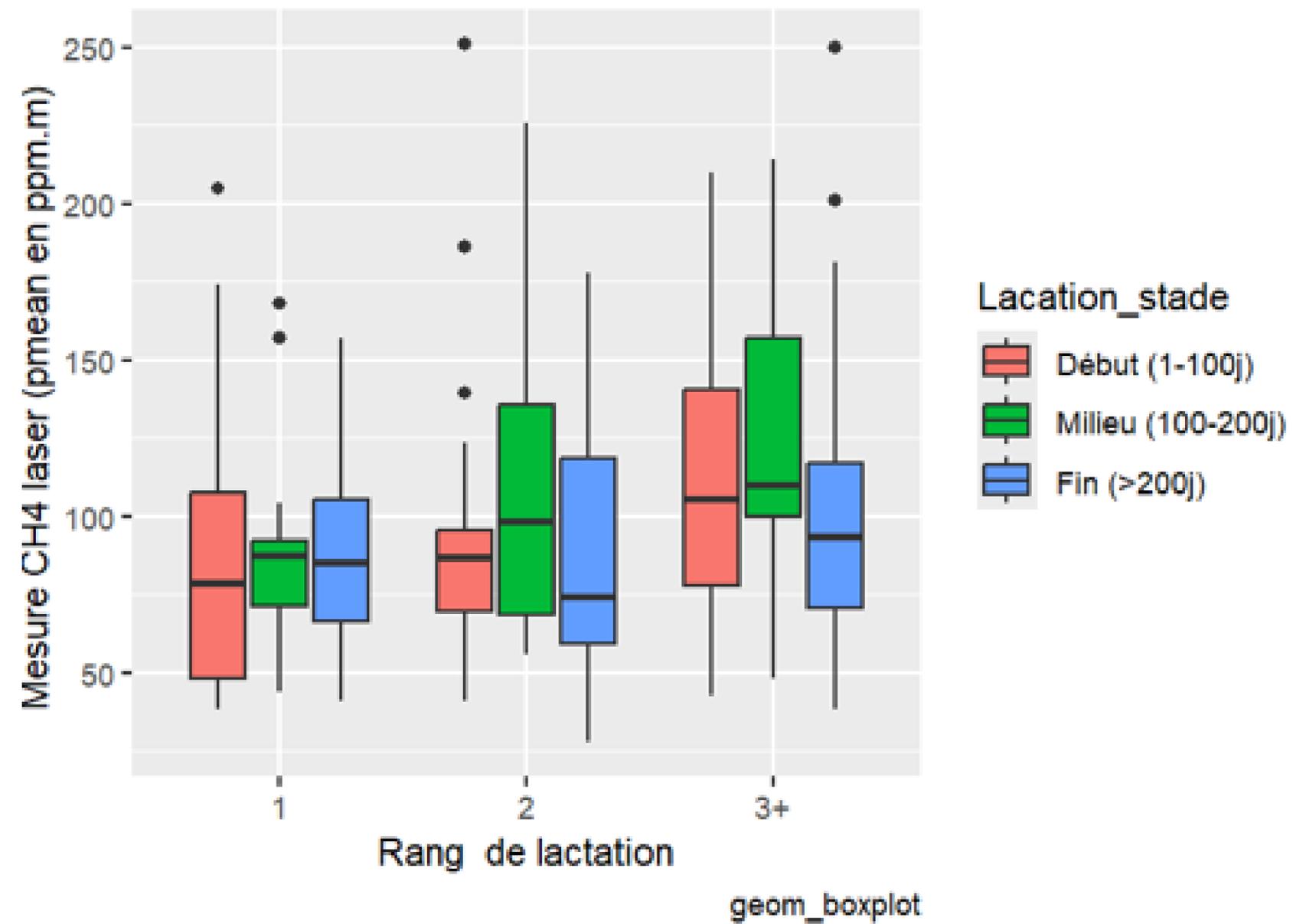
Prise alimentaire plus faible pour le rang 1 car le vêlage est souvent proche de 24 mois et les animaux n'ont donc pas atteint la taille adulte et mangent moins

Stade de lactation  $p = 0.73$  non significatif

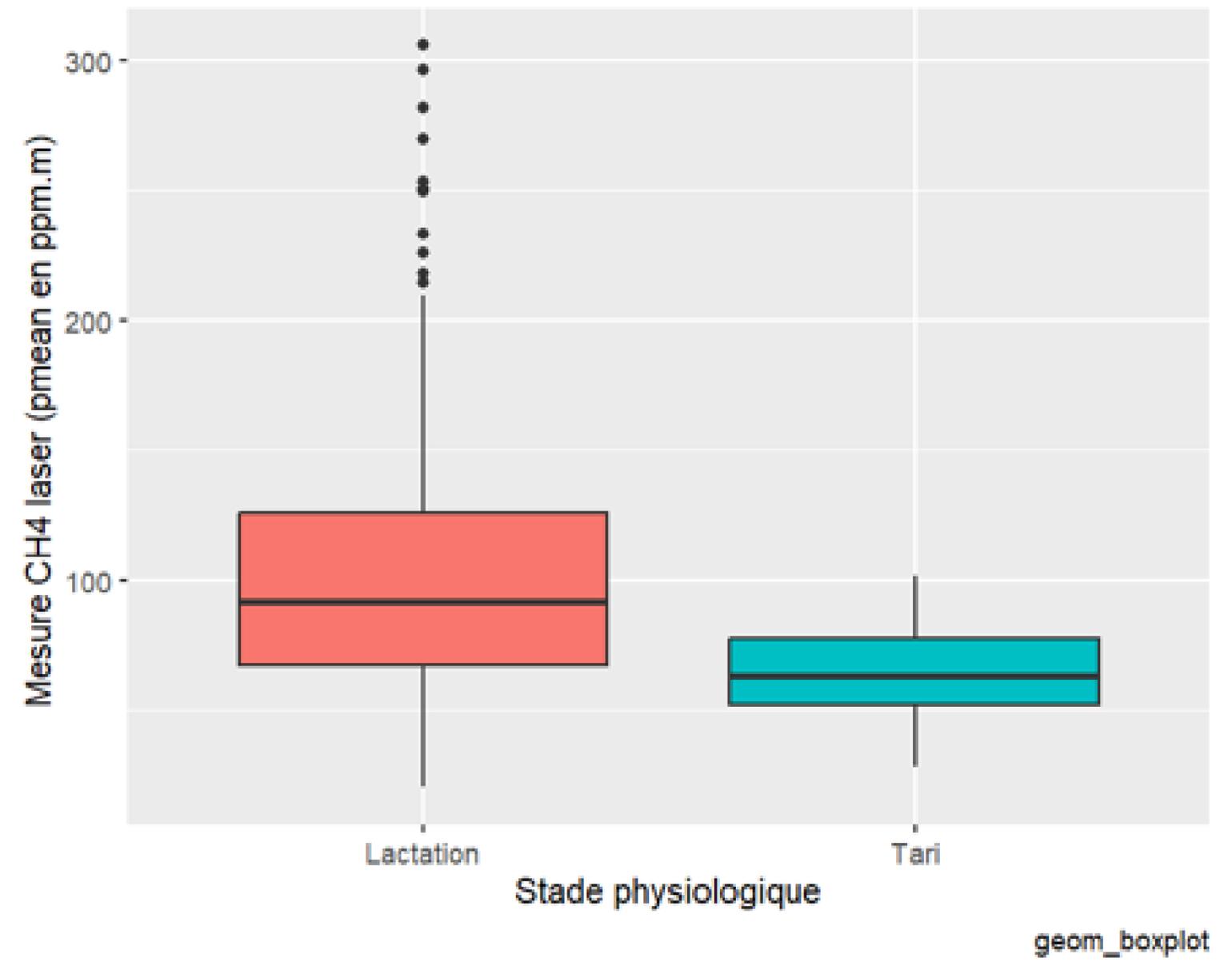
Pas d'interaction entre le stade de lactation et le rang de lactation  $p = 0.381$

# Vaches Laitières

Boxplot des mesures issues du laser en fonction du stade et du rang de lactation pour les vaches laitières



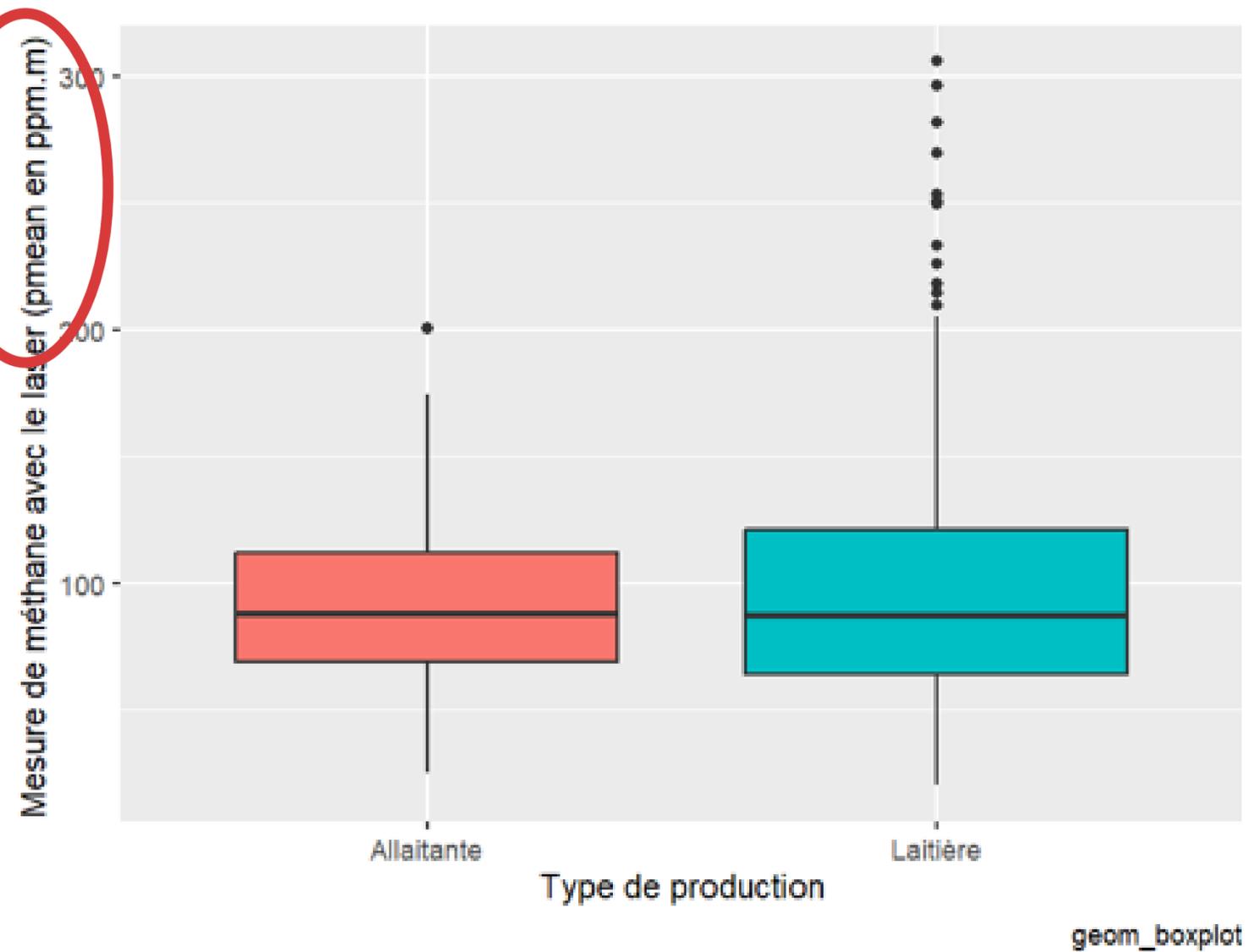
Boxplot des mesures de CH4 issues du LMD en fonction du stade physiologique des vaches laitières



$p\text{-value} < 0.05$

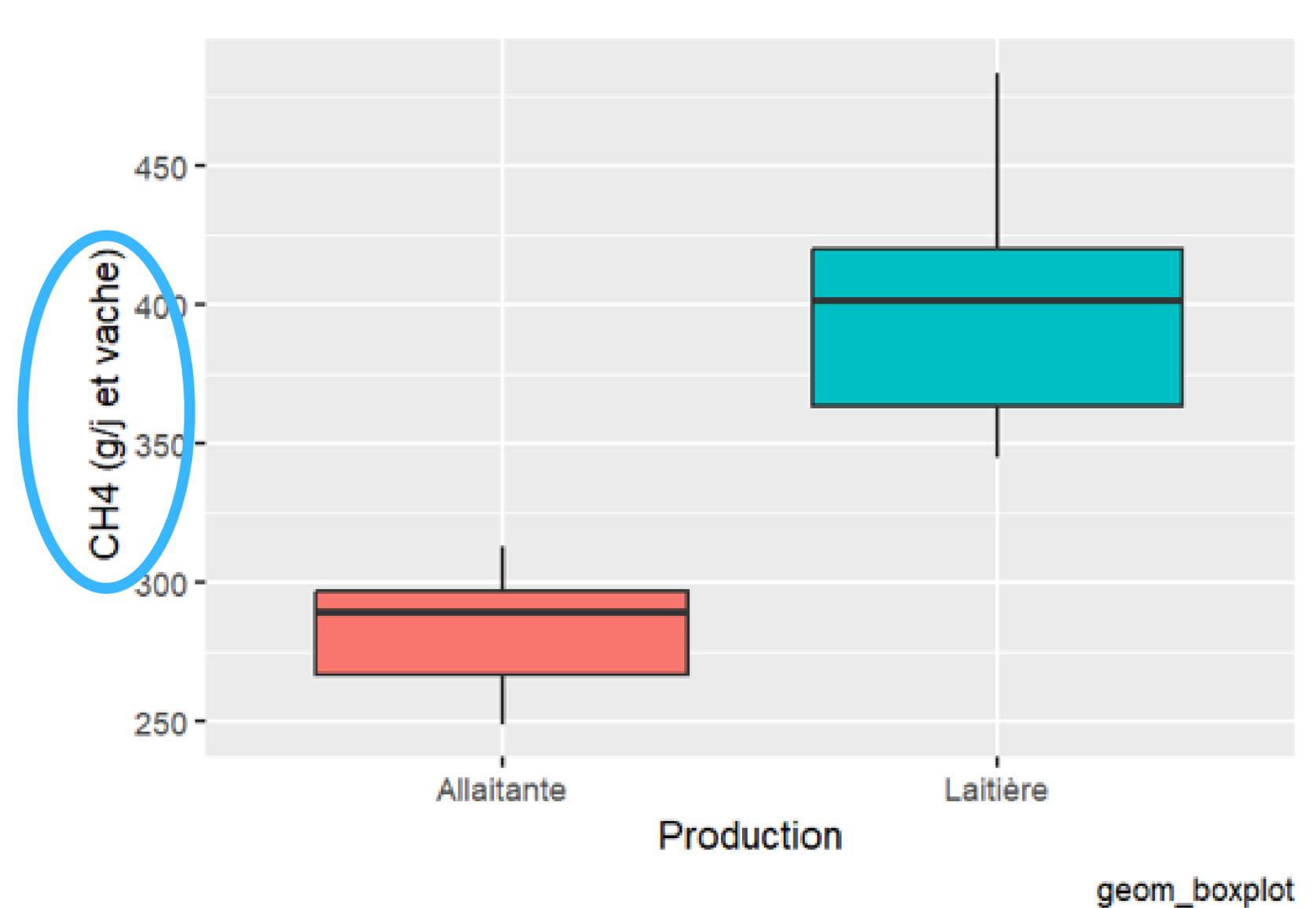
# Comparaison entre les productions

Boxplot des mesures de méthane issues du laser en fonction du type de production



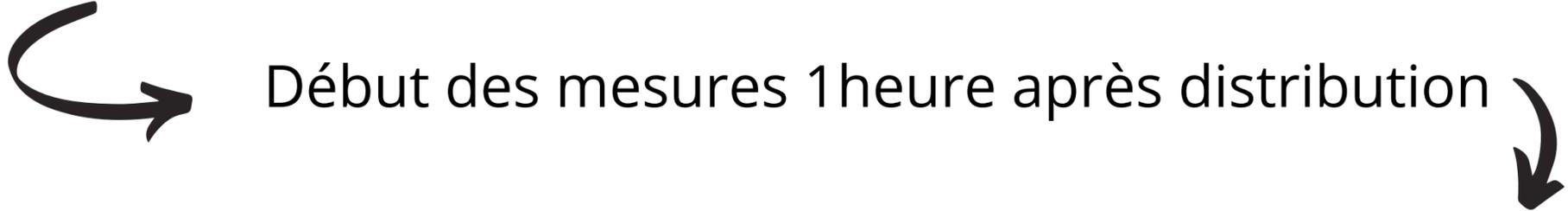
$p$ -value= 0.33

Boxplot des émissions de CH4 entérique issues de CAP'2ER en fonction du type de production



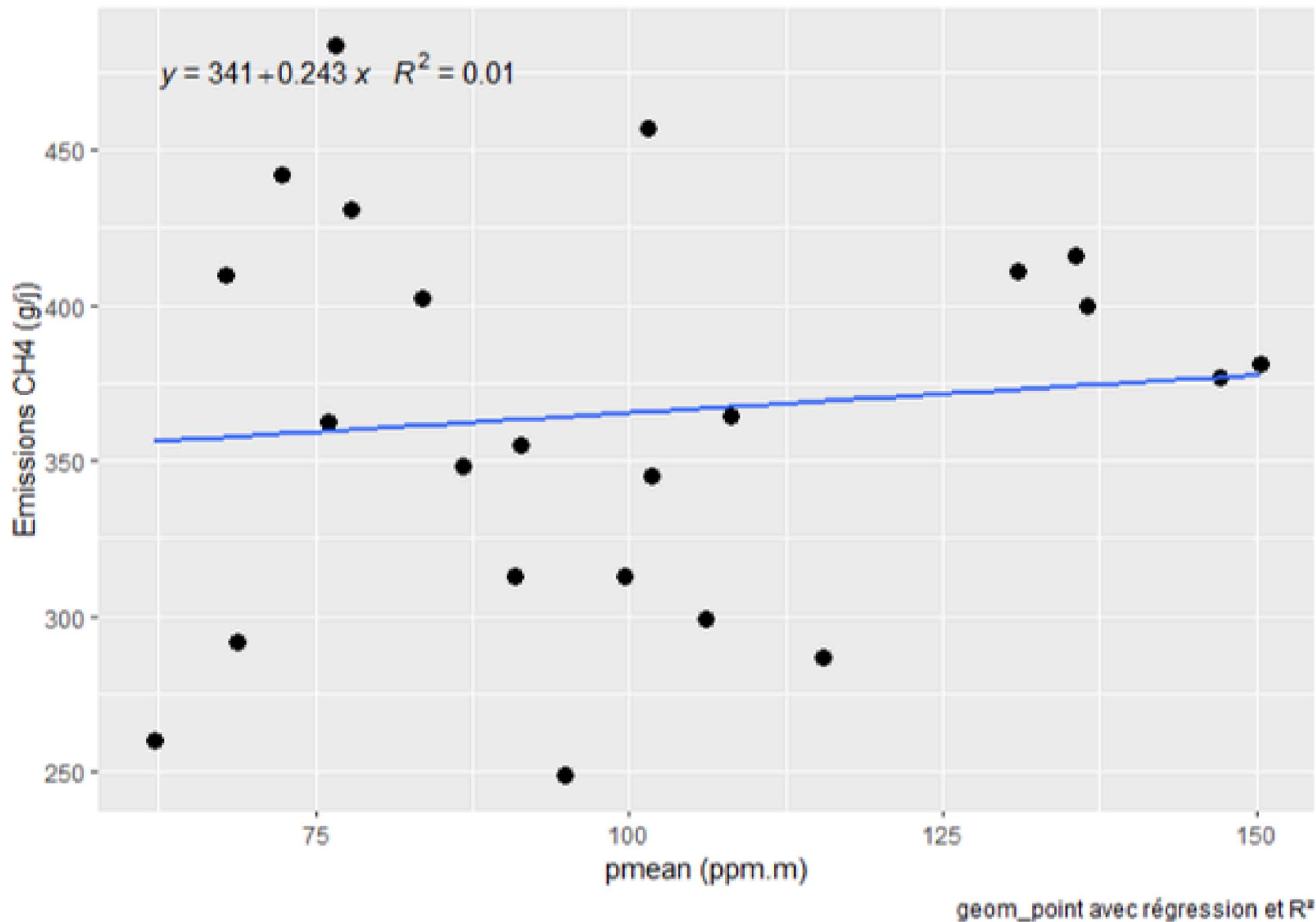
$p$ -value<0.05

Concentration vs flux

- Critères de sélection différents entre les vaches laitières et les vaches allaitantes
- Horaire de mesures différents
  -  Début des mesures 1 heure après distribution
  - Horaires varient entre 6h30 et 18h pour le début des mesures
  - Écart de 2-3heures entre première et dernière vache mesurée
  - Or heure de mesure peut influencer résultats (Gautier, 2021)
- De nombreux facteurs : alimentation pratique d'élevage...
- Corrélation entre concentration et flux intéressant de réaliser comparaison avec même unité Impossible pour le moment
- Pas d'autres études (à ma connaissance) réalisant corrélation entre LMD et équation de Sauvant et Nozière (2013)

# Corrélation entre les résultats LMD et CAP'2ER

Corrélation entre les émissions de CH4 calculées à partir du logiciel CAP'2ER et celles issues des mesures avec le LMD

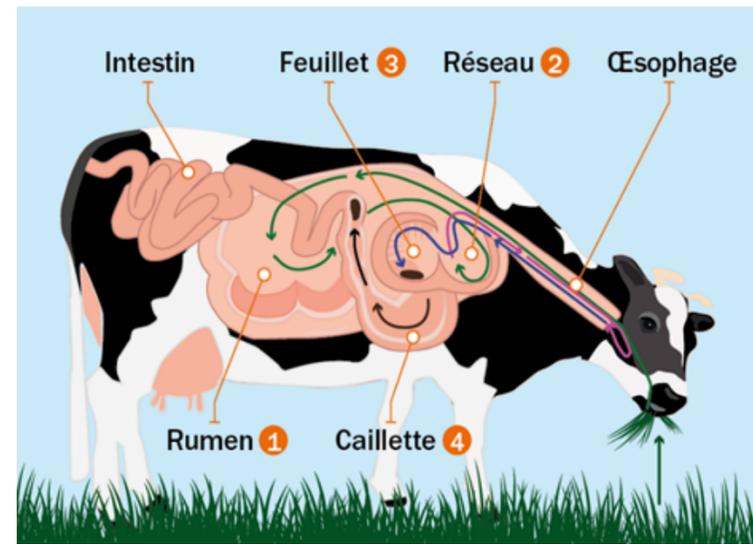


**Régression linéaire**  
 $R^2$  est inférieur à 0,01  
le modèle pas fiables.

# Conclusion



Réduire de 15 %  
l'empreinte carbone de  
la polyculture-élevage



Cheptel bovin représente  
92,84 % des émissions totales  
de méthane entérique

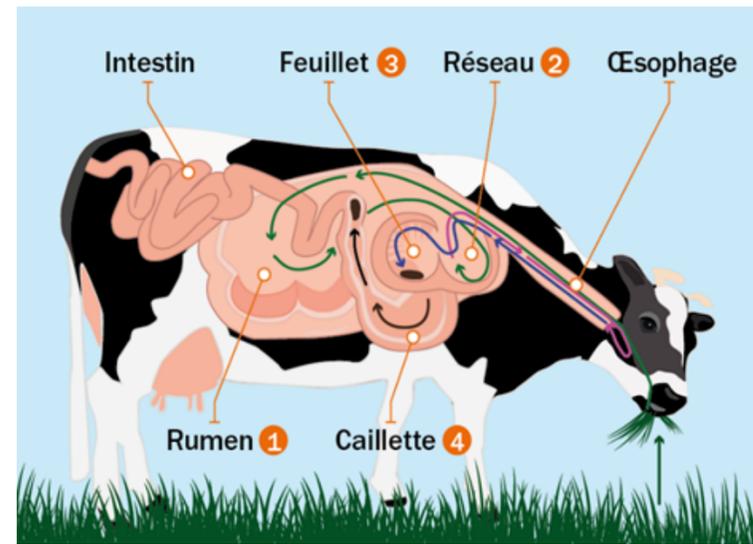


Archées méthanogènes

# Conclusion



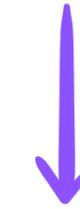
Réduire de 15 %  
l'empreinte carbone de  
la polyculture-élevage



Cheptel bovin représente  
92,84 % des émissions totales  
de méthane entérique



Archées méthanogènes



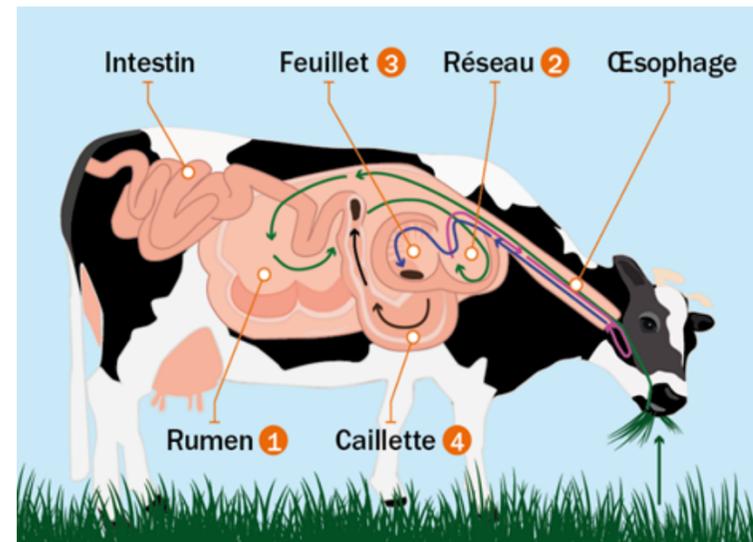
Méthode de mesure/ estimation  
dans le cadre de l'étude



# Conclusion



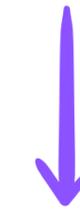
Réduire de 15 %  
l'empreinte carbone de  
la polyculture-élevage



Cheptel bovin représente  
92,84 % des émissions totales  
de méthane entérique



Archées méthanogènes



Méthode de mesure/ estimation  
dans le cadre de l'étude



24 élevage bovins



20 vaches par ferme

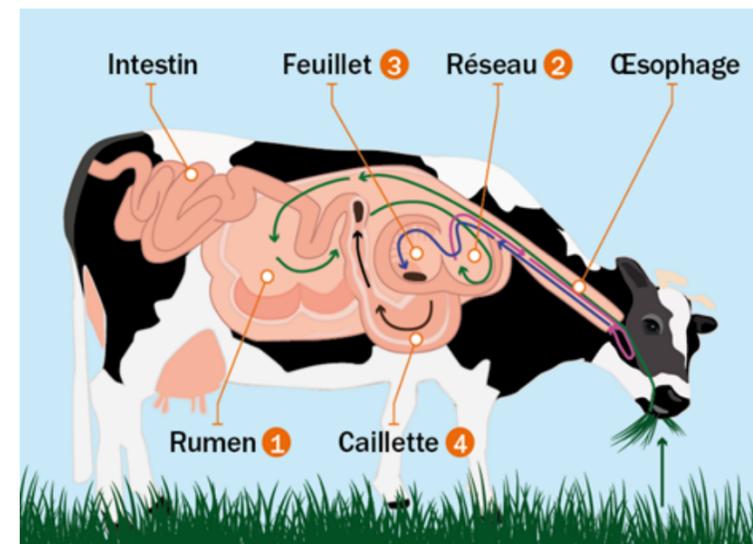


4 minutes par vache

# Conclusion



Réduire de 15 %  
l'empreinte carbone de  
la polyculture-élevage



Cheptel bovin représente  
92,84 % des émissions totales  
de méthane entérique



Archées méthanogènes



Méthode de mesure/ estimation  
dans le cadre de l'étude



24 élevage bovins



20 vaches par ferme

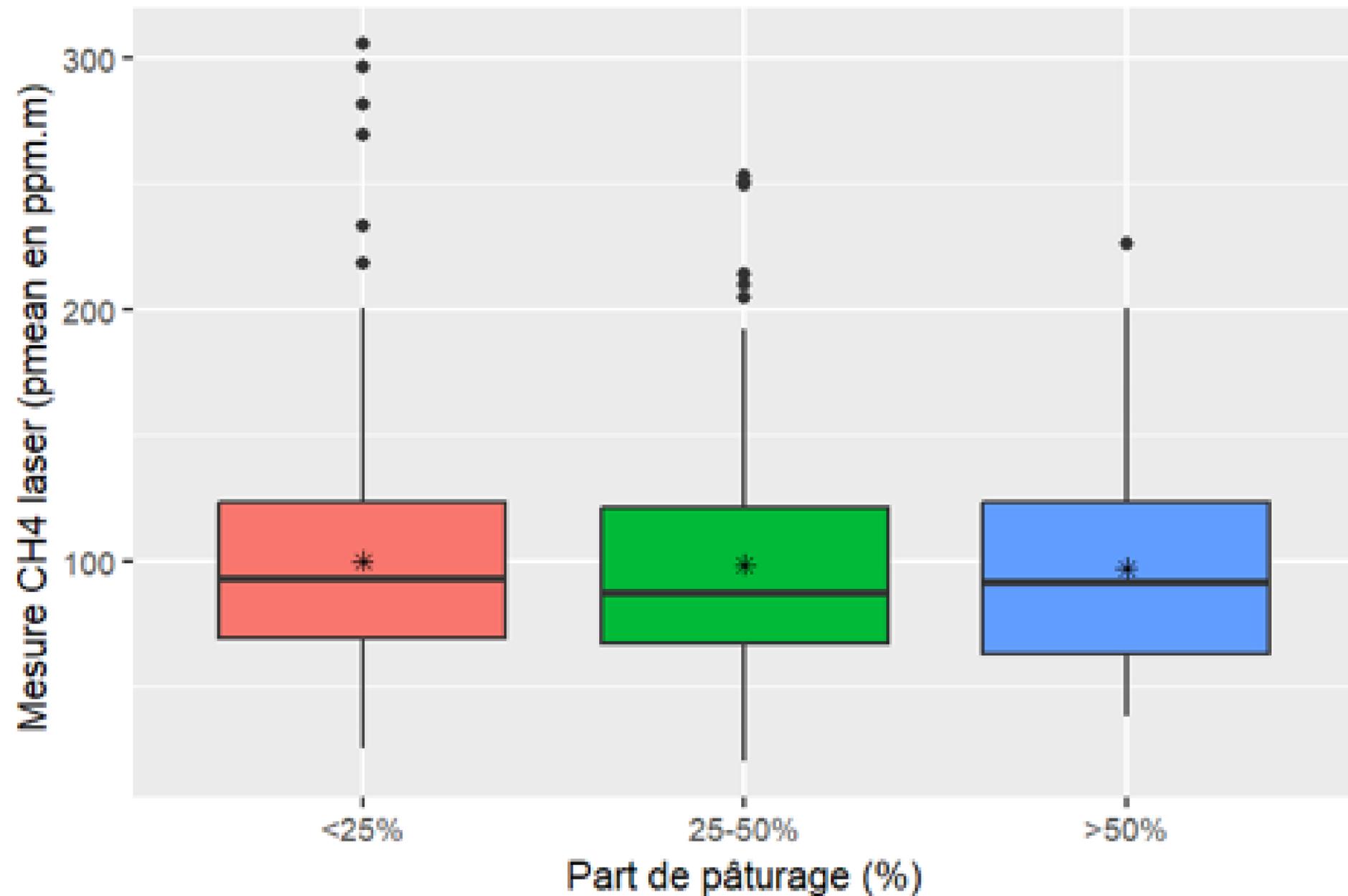


4 minutes par vache

- Pas de corrélation obtenue entre mes résultats issus de CAP'2ER et du LMD
- Différence en fonction de la part de concentré
- Différence en fonction de la parité et stade de lactation
- Différence en fonction du stade physiologique (vaches laitières)
- Amélioration du protocole possible

# Alimentation : part de pâturage dans la ration

Boxplot des émissions de méthane en fonction de la part de pâturage dans la ration



Seules les vaches laitières sont inclus car les allaitantes n'avaient pas encore accès au pâturage

$p$ -value = 0.9931  
différence non significative

geom boxplot



## Vaches laitières

- Modification de la ration
- Utilisation :  
→ Emissions de méthane entérique  
(kg CH<sub>4</sub>/VL/an)



## Vaches allaitantes

- Modification de la ration
- Suppression des autres types d'animaux
- 20% d'animaux pour la réforme  
→ Minimum de vente pour avoir PBVV positif
- Réalisation d'un calcul intermédiaire pour avoir la quantité de méthane / VA : (kg CH<sub>4</sub> / VA / an)  
=RES\_BV\_GES\_CH4\_ENT\_EQCO2\_KGVV x  
VAL\_BV\_PBVV\_TOT / TROUP\_NB\_VA / 27,2

- P<sub>MEAN</sub> avait la répétabilité la plus élevée, bien que ce ne soit pas significatif. Cette répétabilité plus élevée indique un rapport signal/bruit plus élevé
- P<sub>MEAN</sub>, la moyenne arithmétique de toutes les valeurs de pic de CH<sub>4</sub> dans un profil, représente le mieux la concentration de CH<sub>4</sub> dans le souffle de la vache, car il a également été constaté que chaque pic correspond à une expiration. Les creux entre les pics représentent probablement la phase d'inhalation du cycle respiratoire. Étant donné que la phase d'inhalation du cycle respiratoire est indépendante de la production de CH<sub>4</sub>, cela pourrait expliquer la répétabilité accrue de P<sub>MEAN</sub> par rapport à MEAN (la moyenne arithmétique de toutes les valeurs de CH<sub>4</sub> dans un profil). Dans ce cas, MEAN inclut les creux entre les pics (inhalation) et peut être artificiellement dilué par les concentrations de fond de CH<sub>4</sub>.

Equation de conversion du méthane entérique de ppm.m en g/j (Sorg et al., 2018)

$$\text{CH}_4 \text{ (g/d)} = 150.00 + 2.20 \times \text{P\_MEAN (ppm}\times\text{m)}$$

- Réaliser dans des conditions particulières : équation basée sur les résultats obtenus en comparaison avec le Greenfeed
- Mesures réalisées 2 fois par jour (1fois entre 8h-12h et une fois entre 13h-16h)
- Faible nombre d'animaux (11 vaches laitières)
- Uniquement pour les animaux laitiers

Ferme	pmean (ppm.m)	CH4(g/jour)
L1	126	427
L2	85,7	339
L3	66,9	297
L4	76,5	318
L5	72,4	309
L6	72,5	310
L7	91,7	352
L8	116	406

**Travail en cours dans le cadre du projet Méthane 2030**

# Conversion en gramme par jour par VL

**Table 5.2 Regression equations to estimate CH<sub>4</sub> production (g/d) in sheep and cattle using hand-held laser methane detector (LMD) CH<sub>4</sub> concentration (ppm×m or time) based on comparisons with respiration chamber or GreenFeed data**

Model	Equation <sup>1</sup>	Ref <sup>2</sup>
<b>Sheep</b>		
Period 1	CH <sub>4</sub> (g/d) = 156.6 – 1.64 × MaxResp	a
Period 2	CH <sub>4</sub> (g/d) = 95.5 + 72.74 × ErucTime – 1.03 × MaxResp	a
Period 3	CH <sub>4</sub> (g/d) = 184.3 – 17.83 × RespTime – 0.406 × MaxResp	a
Period 4	CH <sub>4</sub> (g/d) = 194.2 – 17.83 × RespTime	a
Period 5	CH <sub>4</sub> (g/d) = 203.9 – 3.45 × MaxResp	a
<b>Cattle</b>		
Beef	CH <sub>4</sub> (g/d) = -514.9 + 9.81 × ErucTime + 31.63 × MaxResp	a
Dairy1	CH <sub>4</sub> (g/d) = 150.00 + 2.20 × P_MEAN (ppm×m)	b
Dairy2	CH <sub>4</sub> (g/d) = (LMD CH <sub>4</sub> (ppm×m) – 127.21) / 2.00	c
Dairy3	CH <sub>4</sub> (mL/m <sup>3</sup> ) = (LMD CH <sub>4</sub> (ppm×m) – 129.1) / 0.75	d

<sup>1</sup>ErucTime, mean eructation time recorded during eructation events (min); MaxResp, maximum CH<sub>4</sub> concentration during respiration events (ppm×m); P\_MEAN, arithmetic mean of all peaks (ppm×m).

<sup>2</sup>References: a, Ricci *et al.* (2014); b, Sorg *et al.* (2018); c, Bruder *et al.* (2017); d, Chagunda and Yan (2011).